



ESTUDIO DE LAS ESTRUCTURAS EN TRACCIÓN CON BORDE RÍGIDO



Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Autora: Inmaculada Jiménez Sánchez
Tutor: José Sánchez Sánchez
Trabajo Fin de Grado de Estructuras
Grupo TFG-B
Curso 2017/2018

ÍNDICE

1. Abstract	3
2. Objetivos	4
2.1. Objetivos generales.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. Metodología	5
3.1. Planteamiento general.....	5
3.2. Planteamiento de los casos de estudio	5
3.3. Puesta en práctica de lo estudiado	5
3.4. Conclusiones.....	6
4. Justificación	7
4.1. Motivación	7
4.2. Delimitación del ámbito de estudio	7
5. Estado de la cuestión	9
5.1. Marco histórico	9
5.2. Introducción	10
5.3. Clasificación de las estructuras textiles en tracción.....	12
5.4. Materiales.....	15
5.4.1. Elementos lineales	15
5.4.2. Cables	15
5.4.3. Elementos especiales	16
5.4.4. Textiles	20
5.4.5. Patroneado.....	21
5.5. Detalles constructivos	21
5.6. Nociones para la comprobación geométrica	23
6. Clasificación de las estructuras enmarcadas y mixtas	25
6.1. Estructuras enmarcadas.....	25
6.2. Estructuras mixtas.....	27
7. Casos de estudio.....	29
8. Propuestas geométricas para el patio de la ETSA.....	46
8.1. Caso 1. Paraboloide hiperbólico A	47
8.2. Caso 2. Paraboloide hiperbólico B	50
8.3. Caso 3. Paraboloide hiperbólico C.....	53
8.4. Caso 4. Conoide A.....	56
8.5. Caso 5. Conoide B.....	58

9. Conclusiones.....	61
10. Bibliografía	62
10.1. Bibliografía general	62
10.1.1. Libros.....	62
10.1.2. Revistas	62
10.1.3. Artículos	62
10.1.4. Páginas Web.....	62
10.1.5. Páginas web de fabricantes.....	63
10.1.6. Apuntes	63
10.2. Imágenes	63

1. Abstract

En este documento pretendo realizar el estudio y análisis de las estructuras textiles que trabajan a tracción, no tan usadas como las llamadas estructuras tradicionales; acercándome así a un nuevo tipo de estructuras, más desconocidas para mí como alumna, y que abarca un gran abanico de posibilidades como estructura ligera.

En general, existen tres tipos de estructuras textiles en tracción; las estructuras de bordes libres o apuntaladas, las estructuras de bordes rígidos o enmarcados y las estructuras de tipo mixto. A la hora de desarrollar el trabajo de investigación, me centraré más pormenorizadamente en las estructuras en tracción de borde rígido y de tipo mixto, detectando y señalando las diferencias y similitudes entre ambos tipos de estructura.

Para desarrollar el documento se planteará desde el estudio de lo más global, incluyendo sus precedentes a lo largo de la historia, así como una serie de casos de estudio de estructuras contemporáneas, extrayendo de este estudio características decisivas como son los materiales y las superficies a las que dan solución este tipo de estructuras.

Para concluir, se planteará como objetivo final del trabajo, el aporte de una serie de propuestas enfocadas a soluciones de cubierta textil de borde rígido, de las cuales estudiaré los esfuerzos que estas sufren en función de su geometría. Cada una de las estructuras de cubrición se planteará en el patio de la Escuela de Arquitectura de Sevilla, junto a la sala de estudios; para lo cual se generarán una serie de modelos con distinta geometría, utilizando para ello la herramienta "Formfinder".

Palabras clave: Estructura en tracción, Borde rígido o enmarcado, Borde mixto, Estructuras ligeras, Análisis, Geometría, Textil, Tejido, Membrana, Paraboloide hiperbólico, Conoide.

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

Realizar el estudio de las estructuras en tracción de borde rígido y tipo mixto, estudiando los antecedentes de este tipo de estructuras, así como los elementos que las conforman y aportar unas nociones básicas para el cálculo de los esfuerzos.

Entender el funcionamiento de este tipo de estructuras, centrándome especialmente en las dimensiones o superficie en que se mueven éstas, así como los materiales más utilizados para su resolución.

2.2. Objetivos específicos

Poner en práctica los conocimientos extraídos del estudio y análisis de los distintos casos de estudio, realizando distintas propuestas de estructura en tracción de tipo enmarcado para cubrir el patio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Para ello realizaré el estudio geométrico de las propuestas realizadas, sacando las conclusiones pertinentes acerca de este análisis geométrico.

3. Metodología

Para poder alcanzar los objetivos que se han propuesto, será necesario establecer una metodología que marque el camino a seguir para llegar a conocer las bases y generalidades de este tipo de estructuras. Por ello, a continuación establezco los puntos a seguir para el desarrollo de la investigación:

3.1. Planteamiento general

Para comenzar a trabajar, empezaré analizando los antecedentes de las actuales estructuras en tracción, lo cual considero de importancia para sentar unas bases a partir de las cuales ir desarrollando el estudio.

Posteriormente, realizaré el estudio de los distintos tipos de estructuras en tracción que existen, clasificándolas según el tipo de borde con que se resuelven, para finalmente centrarnos en las estructuras de borde rígido y mixto, las cuales serán los objetivos finales del estudio. En este punto, también considero de interés, señalar los distintos elementos que conforman este tipo de estructuras, así como los materiales más usuales con los que se ejecutan.

Una vez tenga recogida toda la información general de estas estructuras, me centraré en una búsqueda más concreta de los distintos casos de estudio. Finalmente, tras realizar el análisis, concluiré con el desarrollo de cinco propuestas geométricas, para analizar comparativamente los distintos casos.

3.2. Planteamiento de los casos de estudio

Parte importante de este trabajo, será centrarme en el análisis de los distintos casos de estudio, a fin de conocer una serie de características de los mismos. Por tanto, los pasos a seguir en este sentido serán:

1. Realizar una búsqueda de distintas estructuras en tracción, de las que pueda extraer información sobre usos, materiales y dimensiones o superficies que son capaces de cubrir dichas estructuras.
- 2- Clasificar los distintos casos de estudio según sean estructuras de borde rígido o bien de tipo mixto, desechando las de borde libre, por no ser objeto del estudio actual.
3. Elaborar una ficha para cada caso de estudio, señalando todos los aspectos nombrados en el punto anterior, además de otros aspectos como son el proyectista, la ubicación y un breve resumen, para contar las características a destacar o que considere de interés en el edificio de estudio.

3.3. Puesta en práctica de lo estudiado

Tras haber realizado el estudio de una serie de casos, analizando las características geométricas de los mismos, ya estaré en posición de realizar las distintas propuestas para la cubrición del patio de la escuela. Ya que he analizado distintos casos de estudio, escogeré algunas de las geometrías presentes en ellos, dándoles distintas luces y curvaturas. A este fin, recurriré a la herramienta “Formfinder” que permite introducir superficies de doble curvatura.

3.4. Conclusiones

Una vez analizadas las distintas propuestas, procederé a la comparativa de las mismas en función de los datos obtenidos, extrayendo de esta comparativa las correspondientes conclusiones.

4. Justificación

4.1. Motivación

Podemos ver la arquitectura, como la unión entre un mundo abstracto y un mundo formal, en el que la unión de ambos se concreta en la materialización de la obra de arquitectura. Se trata de dos ramas de una misma cosa, que, aunque parezcan opuestas, no se pueden llegar a entender la una sin la otra, enriqueciéndose mutuamente y llenándose ambas de valor.

“... el arquitecto (architectore) será aquel que con un método y un procedimiento determinados y dignos de admiración, haya estudiado el modo de proyectar en teoría y también de llevar a cabo en la práctica cualquier obra que, a partir del desplazamiento de los pesos y la unión y el ensamble de los cuerpos, se adecue, de una forma hermosísima, a las necesidades más propias de los seres humanos” (Alberti, 1452, De Re Aedificatoria).

La rama abstracta de la arquitectura, se puede decir que es la más teórica e imaginativa, sobre la que se sientan las bases del diseño, ocupándose de características arquitectónicas como pueden ser la luz (*Imagen 4.1.1*), la relación de llenos y vacíos, el mundo de las ideas y el de los volúmenes. Por otra parte, la rama más concreta y precisa de la arquitectura es aquella que se centra en la materialización real de la obra de arquitectura, la que estudia características tales como el sistema estructural (*Imagen 4.1.2*), el sistema constructivo, la funcionalidad y la normativa. Estos últimos son indispensables para la materialización de una obra de arquitectura que, a la vez que bella, se comporte de acuerdo a las necesidades de los usuarios.

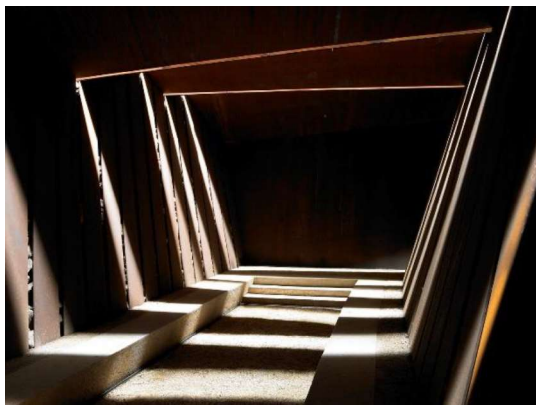


Imagen 4.1.1. Bodegas Bell Lloc. RCR

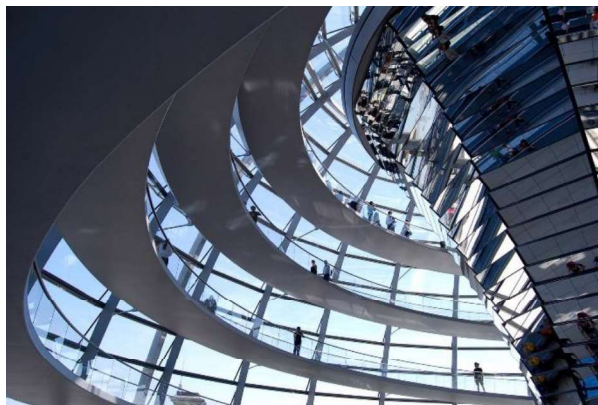


Imagen 4.1.2. Cúpula del Reichstag. Norman Foster.

Si bien dentro de este amplio mundo de la arquitectura estamos acostumbrados a tratar con sistemas de construcción tradicionales, existen numerosos sistemas de construcción ligera u otras sistemas innovadores con los que, aún hoy, no estamos tan familiarizados en lo que a enseñanza se refiere. Por este motivo, he considerado que este mundo de las estructuras ligeras, puede ser un buen campo de estudio, que me dé la posibilidad de un mayor acercamiento a este tipo de estructuras, llegando a conocer más de cerca la forma en que se diseñan y ejecutan las mismas, los casos en los que es más usual recurrir a éstas, así como sus características más significativas.

4.2. Delimitación del ámbito de estudio

Dentro de las estructuras ligeras existen una gran variedad de sistemas y subsistemas sobre los cuales podría haber centrado mi estudio. Sin embargo, me he decantado por el estudio de las

estructuras textiles que trabajan a tracción. El decidirme por este campo de estudio en concreto, se debe a mi desconocimiento por la forma en que se plantean este tipo de estructuras, considerando que ésta es una buena oportunidad para tener un conocimiento que me acerque más a dichas estructuras.

Por otra parte, dentro de este ámbito de las estructuras en tracción, existen varias clasificaciones que pueden aportar un sinfín de casos que estudiar, por tanto, se ha considerado que era más acertado acotar un poco más el ámbito de estudio. De modo que, atendiendo a una clasificación según el tipo de bordes de la estructura, se ha limitado el estudio a las estructuras con borde rígido y a las de borde de tipo mixto, las cuales combinan los bordes rígidos con los bordes libres o en relinga.

5. Estado de la cuestión

5.1. Marco histórico

Para llegar a comprender la forma de trabajo de las estructuras en tracción, es necesario conocer los antecedentes históricos que, en su día, sentaron las bases para las estructuras que conocemos hoy, y estos antecedentes los encontramos en las estructuras colgadas. Los datos que se tienen actualmente, colocan a los pueblos nómadas como los precursores de este tipo de arquitectura. Estos pueblos, concebían la vivienda como algo transitorio, no era algo que fuera a ser usado durante toda su vida. “El nómada vive no tanto en su tienda en el desierto, la estepa o la tundra” (Murray, 1979, *Architecture of the nomads*, pp. 7). Aunque propia de los pueblos nómadas, se considera que este tipo de estructuras son más recientes que las estructuras pesadas: “no es posible que tengan mayor antigüedad que las primeras estructuras rígidas” (Escrig y Sánchez, 2005, *STAR. Structural Architecture N°5*, pp. 7).

Las primeras tiendas usadas por los nómadas estaban constituidas por telas, las cuales contaban con agujeros para el humo y brechas entre zonas, lo que hacía que la separación entre el interior y el exterior de la tienda no fueran tan contundentes; es decir, que existiera una relación entre el interior y el exterior, hecho que los pueblos nómadas valoraban positivamente. Además, es de señalar que estas tiendas eran de pequeñas dimensiones, y se encontraban divididas interiormente según el tipo de trabajo a realizar y el sexo de sus ocupantes.

Se cree en la posibilidad de que el nacimiento de este tipo de tiendas, tenga su origen en los beduinos, ubicándolas algunos autores cerca de Mesopotamia (Imagen 5.1.1.), tribus que posteriormente, se fueron extendiendo por África y Asia.

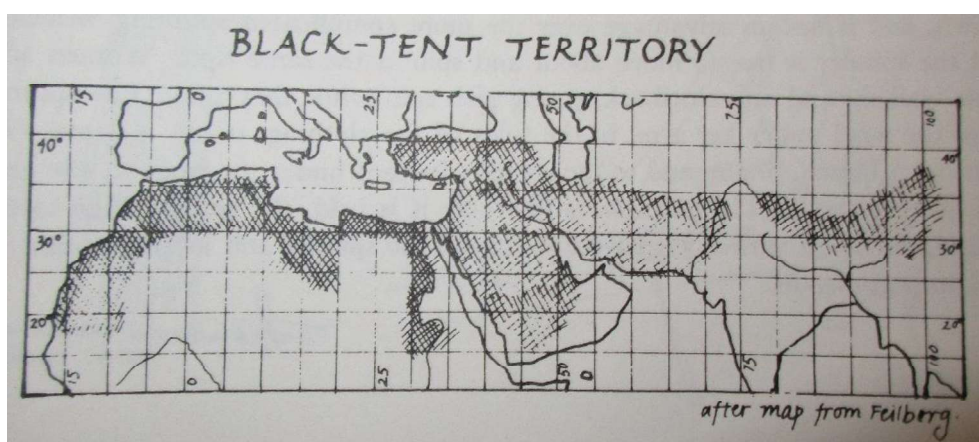


Imagen 5.1.2. Expansión beduina.

El autor del libro “Architecture of the nomads”, aporta unos esquemas (Imagen 5.1.2.) de como podrían haber sido este tipo de tiendas, aportando características de las mismas, como serían:

- Perfil plano, para ser usadas en el desierto.
- Elemento de madera (o trapos) en la parte superior cosido a la “triga”.
- Uso de trapos en lugar del elemento de madera.
- Textil enterrado bajo rocas y arbustos.
- Vientos con los que se ancla a un arbusto que se entierra.
- Cortina trasera sujeta al techo de la tienda.

- Gran variedad de elementos de sujeción.

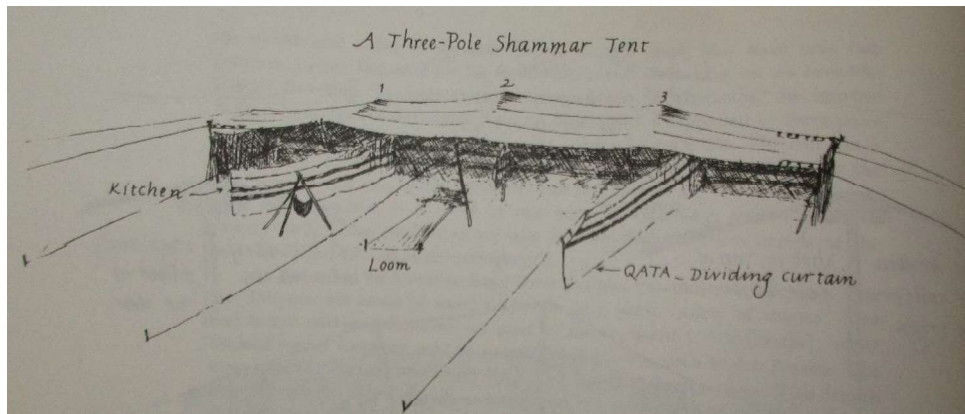


Imagen 5.1.2. Esquema tienda Beduina

Avanzando un poco más en el tiempo, encontramos antecedentes de estas estructuras en las velas de los barcos, las cuales fueron desarrolladas por los cartagineses, tecnologías que posteriormente fueron importadas por el pueblo romano, dándoles a éstas un nuevo rumbo usándolas para la cubrición de algunos de sus edificios de obra civil. Estas cubiertas se solucionaban con unos mástiles a los que se ataban una serie de cuerdas, que, a su vez, aguantaban la estructura textil; este tipo de cubrición era conocida como “velum”. Dos ejemplos muy representativos de esto son el Coliseo de Roma y el Teatro Romano de Mérida.

Por último, las estructuras catenarias, en las que los primeros elementos documentados en los que se usan este tipo de estructuras en Europa, según la revista STAR nº5 pp.8, es en el siglo XVI “en las que las cadenas de hierro forjado se usan extensivamente para el refuerzo de estructuras e incluso como soporte de estructuras de luces medias” (Escrig y Sánchez, 2005, STAR. Structural Architecture Nº5, pp. 7).

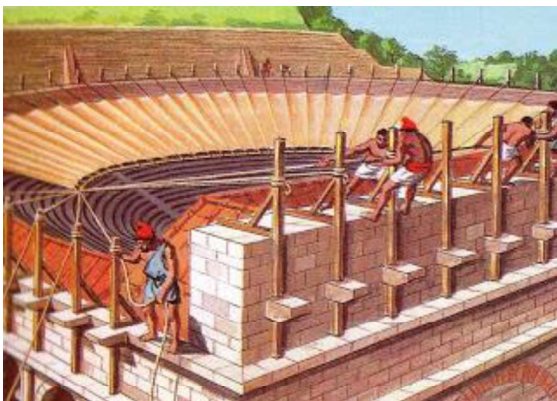


Imagen 5.1.3. Ejemplo de cubrición de un teatro romano.



Imagen 5.1.4. Recreación del Coliseo de Roma.

5.2. Introducción

Las estructuras en tracción, son aquellas que trabajan fundamentalmente a esfuerzos de tracción. Esto no quiere decir que estas estructuras no soporten cargas puntuales de compresión; sin embargo, para que funcionen adecuadamente, el valor de los esfuerzos de tracción debe superar al de los esfuerzos de compresión, ya que para resolver estas estructuras

se recurre a elementos tipo cable o textil, las cuales soportan los esfuerzos de tracción, pero se deforman, llegando a ser inservibles bajo esfuerzos de compresión.

Para que estas estructuras trabajen adecuadamente, se diseñan de forma que el elemento textil tenga doble curvatura, por lo que se suele recurrir a dos tipos de geometrías fundamentales:

- **Paraboloide hiperbólico o hypar:** se trata de una superficie alabeada con curvatura de Gauss negativa, ya que el centro de curvatura de una de las familias se encuentra en el semiespacio superior, mientras que el centro de curvatura de la otra familia de curvas se encuentra en el semiespacio inferior.

Es decir, está formada por dos familias de parábolas, cada familia en una dirección, las cuales no tienen que ser ortogonales; si lo son, sería un paraboloide equilátero. Si cortamos la superficie en las direcciones de curvatura máxima, obtendríamos parábolas, mientras que si las cortamos en el plano bisectriz de esas parábolas obtendríamos rectas. Por último, si hacemos el corte en cualquier otra dirección obtenemos hipérbolas.

Esta geometría se obtiene variando las alturas de los vértices de dicha superficie.

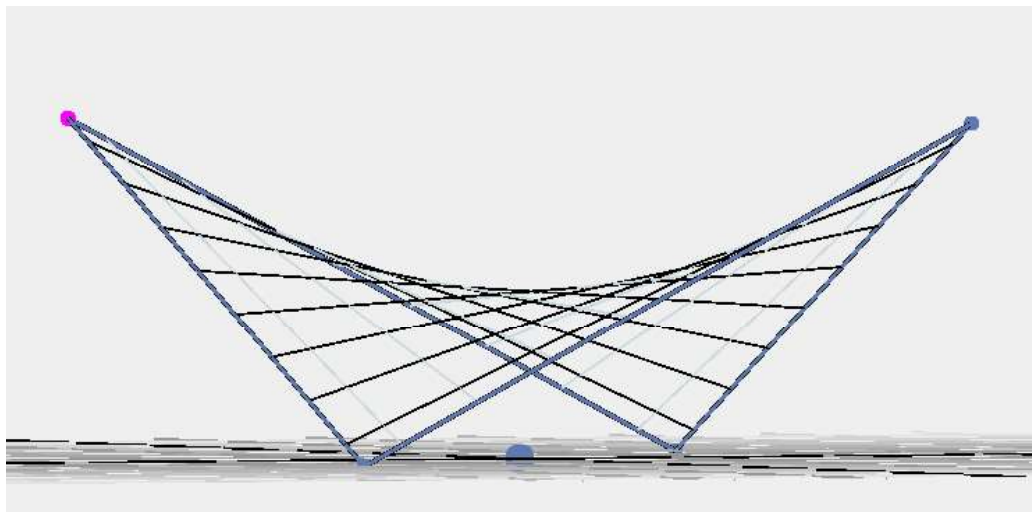


Imagen 5.2.1. Paraboloide hiperbólico.

“Estructuralmente el Hypar tiene parábolas en compresión, las convexas; y en tracción, las cóncavas. Esto supone que el pandeo de la superficie está muy coartado por las parábolas en tracción y es una lámina con menos problemas de pandeo global que las láminas de doble curvatura convexas.” (Cobrerros, 2013, Félix Candela y el Hypar, pp. 2).

- **Conoide:** al igual que el anterior se trata de una superficie de doble curvatura con curvatura de Gauss negativa. En cualquier punto en que nos situemos sobre dicha superficie, encontraremos una curva cóncava y otra convexa.

Esta geometría se obtiene haciendo girar respecto a un eje una curvatura, siempre y cuando el centro de la curvatura esté en el exterior respecto a la superficie que se forma.

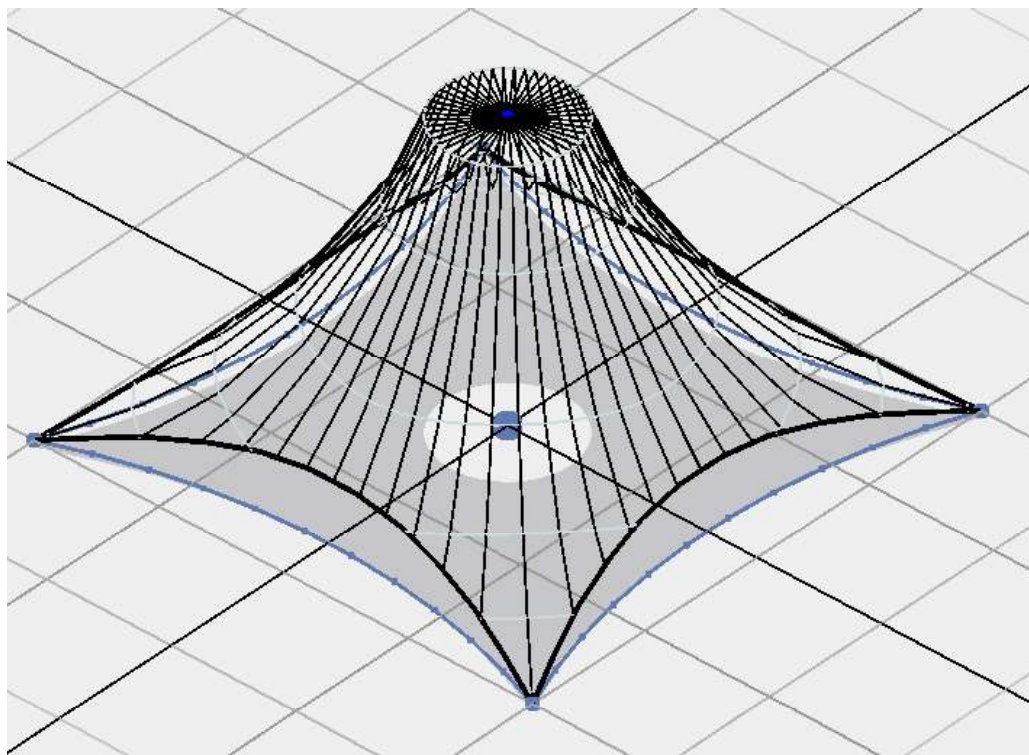


Imagen 5.2.2. Conoide.

En caso de que aparezcan elementos planos, pueden aparecer los problemas, ya que la acción del viento sobre la estructura, puede provocar vibraciones.

5.3. Clasificación de las estructuras textiles en tracción

Dentro de las estructuras textiles que trabajan a tracción, podemos hacer una primera clasificación, más global, atendiendo al tipo de borde de las mismas:

- **Estructuras de borde libre o apuntaladas:** son aquellas estructuras que, teniendo doble curvatura, cuenta con bordes rematados en relinga, es decir, no se terminan con ningún elemento rígido que le dé forma a los bordes, sino que estos cuentan con una curvatura que irá en función de las tensiones que soporte y el cálculo de la misma. Cabe destacar, que este tipo de estructuras necesitan del uso de vientos para conseguir la estabilidad. Estos vientos pueden estar compuestos de cables cuya función es estabilizar el mástil al que se une el textil. Para que este mástil permanezca estable en el espacio, habrá que colocarlo en tres direcciones compensadas, al contar con el textil en una dirección, la estabilidad se puede reducir a la colocación de dos vientos.

“Las tensadas apuntaladas son aquellas cuya estabilidad se garantiza por el apoyo en puntos altos y tensados en puntos bajos, dejando el resto de contorno libre. Requieren soportes de gran envergadura y fuertes anclajes con tracciones en la cimentación, así como cables de borde de dimensiones importantes. El mayor inconveniente de estas estructuras es el de que antes de recibir las acciones exteriores ya están transmitiendo fuertes compresiones y tracciones a la

cimentación, de tal modo que su resultante se equilibra a cero, pero que obliga a costosas infraestructuras enterradas. Las acciones exteriores no hacen sino incrementar estas acciones.” (Escrig y Sánchez, 2005, STAR. Structural Architecture N°6, pp. 5-6).



Imagen 5.3.1. Dance Pavilion. Frei Otto.

- **Estructura textil de borde rígido o enmarcadas:** éstas tienen en común con las anteriores, la necesidad de recurrir a la doble curvatura para el desarrollo de su función estructural. Sin embargo, como el propio nombre indica, la principal diferencia radica en el tipo de borde. En estas estructuras, se coloca un elemento de borde que le da rigidez a la misma, este borde puede variar siendo de distintos materiales, aunque generalmente se suele recurrir al acero para ello. A este elemento rígido se adapta el textil tomando la forma final del mismo. Este tipo de estructuras, al tener los bordes rígidos, no suele requerir el uso de vientos para su estabilidad, ya que las tensiones interiores se equilibran con el elemento de borde, no generándose empujes exteriores. Estos bordes pueden ser tanto elementos conformados por una sola pieza como elementos en celosía.

“Las tensadas enmarcadas son capaces de compensar sus esfuerzos globalmente y transmitir a la cimentación solo las cargas exteriores. Por otra parte son enormemente sencillas de aspecto porque suelen adaptarse a estructuras muy rígidas moduladas. Ligadas a mallas espaciales no necesitan estar coaccionadas en todo su contorno. Vinculadas a curvas alabeadas en el espacio, dan soluciones de gran belleza, muy económicas en rendimiento por unidad de superficie y muy económicas de cimentación”. (Escrig y Sánchez, 2005, STAR. Structural Architecture N°6, pp. 6).



Imagen 5.3.2. Borde rígido con elementos en celosía.



Imagen 5.3.3. Borde rígido con elementos lineales.

- **Estructura textil de tipo mixto:** Podemos concebir este tipo de estructura como una combinación, un híbrido, de las dos anteriores, ya que combina el uso del borde rígido, con el de borde libre o eslingas. Según el diseño de la estructura y sus dimensiones, puede necesitar o no vientos para su estabilización.

“Las tensadas mixtas son las que requieren de la colaboración de otras estructuras adicionales, sean también tensadas o rígidas. No tienen las ventajas de sencillez y economía de las anteriores [tensadas apuntaladas] y tienen los mismos inconvenientes: cimentaciones costosas y fuertes elementos de borde. Sin embargo, permiten resolver problemas de grandes luces y geometrías de características especiales.” (Escrig y Sánchez, 2005, STAR. Structural Architecture Nº6, pp. 6).



Imagen 5.3.4. Estructura textil de tipo mixto.

5.4. Materiales

Considero de interés señalar algunas referencias con respecto a los materiales que se usan para la ejecución de las estructuras textiles. Atendiendo a los elementos que componen, estos materiales pueden ser:

5.4.1. Elementos lineales

En elementos portantes, tipo mástil o elementos de borde, se pueden usar distintos materiales, entre ellos el aluminio y la madera, que aguantan bien los ambientes agresivos. Sin embargo, el material más recurrente en este tipo de elementos es el acero que, a diferencia de los dos anteriores, no se comporta bien en ambientes agresivos.

5.4.2. Cables

Los cables, compuestos de alambres o hilos, se conforman helicoidalmente respecto a un alma. Estos cables pueden realizarse tanto con materiales naturales, como son el cáñamo, el lino y el algodón, como con materiales artificiales, como son el acero, el acero inoxidable, la fibra de carbono, el nylon,... Siendo finalmente el acero el material más usado para este cometido, manifestándose con el tipo de cable Warrington (6x19+1).

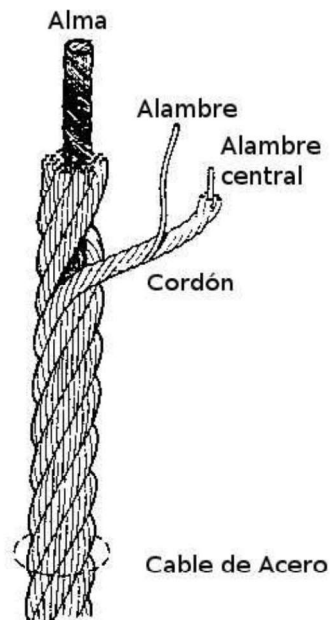


Imagen 5.4.2.1. Partes del cable.

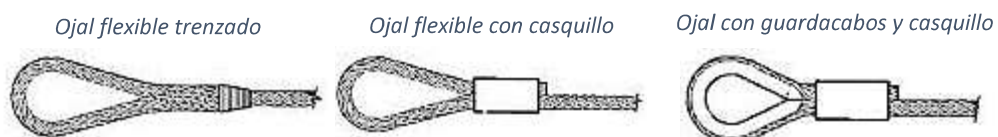
En función del tipo de hilo o alambre que se usen y la cantidad de carbono de las mismas tendremos resistencias distintas, siendo el acero 160 Ø20 el más usado actualmente.

5.4.3. Elementos especiales

- Unión de cables

Cuando es necesario el uso de cables, se vuelve indispensable el uso de elementos especiales, tanto terminales, para que no se deshilachen los extremos del propio cable; como elementos de unión entre varios cables o entre el cable y otro elemento.

Los elementos de terminación pueden ser de distintas formas que se decidirán según diseño.



Ojal con guardacabos y sujetacables

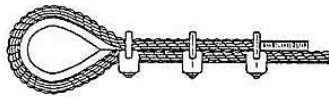


Imagen 5.4.3.1. Tipos de terminales de cable

Terminal cerrado



Terminal de horquilla



Imagen 5.4.3.2. Otros elementos terminales

En cuanto a los elementos de unión entre cables existen numerosas posibilidades, entre las que se encuentran la terminal de hojo, de horquilla, de espárrago y la terminal doble, entre otras.

Por último, es necesario el uso de una serie de elementos o “ganchos” que conecten el cable con el elemento al que se quiere fijar.



Imagen 5.4.3.3. Accesorios de unión

- Unión textil con borde rígido

Según se recoge en el libro “European Design Guide for Tensile Surface Structures”, existe una gran variedad de soluciones con las que solventar este encuentro, sin embargo, resalta tres de ellas, por considerarlas las más usadas actualmente.

En primer lugar, se recoge la solución de rodear el tubo con el textil, dejándolo embebido dentro del mismo. Una segunda opción pasa por utilizar un perfil tubular con

una ranura tipo guía, donde se han introducido unas pletinas con los bordes doblados a fin de poder “enganchar” un cable que lo una a la lona a través de unas arandelas que vienen previstas en la misma. Como última opción, se recoge el uso de dos perfiles entre los que se aprisiona el textil, estos perfiles se unen mediante tornillos para impedir movimientos de la membrana.

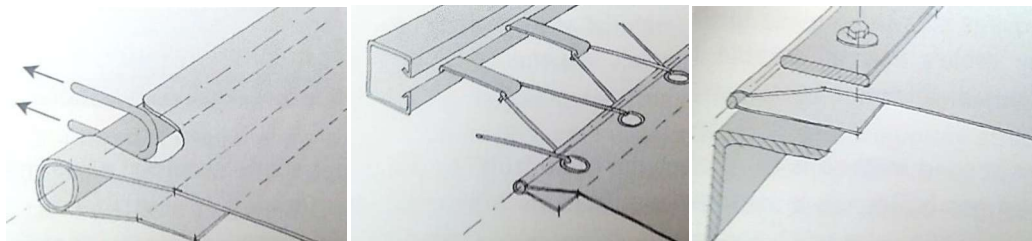


Imagen 5.4.3.4. Unión textil-borde rígido.

- **Eslingas**

En el caso de las estructuras de tipo mixto (además de las de borde libre, que no son objeto de estudio en este caso), aparecen bordes en eslinga, por tanto considero necesario señalar algunas de las terminaciones más importantes de este tipo. Al igual que en el caso de las soluciones de borde enmarcado, en el libro “European Design Guide for Tensile Surface Structures” se recogen una serie de ejemplos de cómo solucionar estos bordes.

Las soluciones que se reflejan como las más comunes es usar un cable, que quedara perdido dentro del doblez del textil, sin embargo se señala que “cuando los esfuerzos tangenciales son altos, la concentración de los esfuerzos en las esquinas puede llegar a ser crítica” (Foster y Mollaert, 2004, European Design Guide for Tensile Surface Structures, pp. 156). Otras de las soluciones propuestas es la de usar unas chapas atornilladas cogiendo en medio de ellas el textil, y unir estas chapas mediante pletinas curvadas entre las que se pasa el cable que posteriormente se tensará. Por último, también pueden terminarse con un elemento “cinturón” al que pueden ir cosido o soldado el textil.

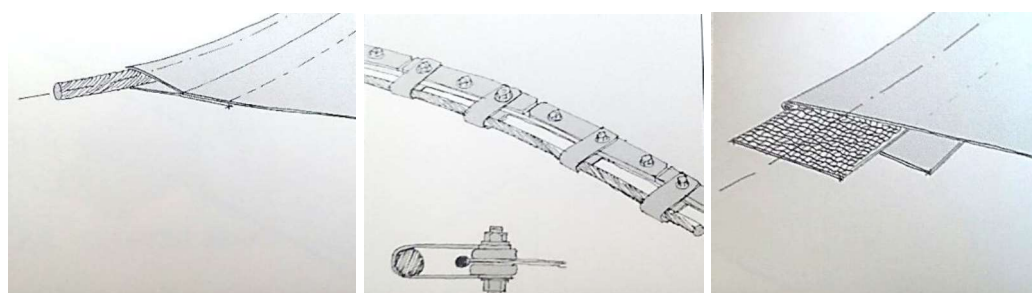


Imagen 5.4.3.5. Tipos de eslinga.

- **Unión entre textiles**

Una vez patroneado el elemento textil para conseguir la forma deseada, es necesario recurrir a elementos de unión entre las distintas piezas textiles. Según el acabado que se quiera obtener, se puede optar por distintas opciones, entre ellas está el unir las

distintas piezas con cordones, “cosiendo” las piezas mediante lazada de los mismos; también se pueden unir mediante pletinas, aprisionando entre éstas al textil, y realizando la unión entre pletinas mediante tornillería. Sin embargo, existe una opción que da un acabado más sutil, que consiste en soldar mediante la aplicación calor entre las distintas piezas haciendo que se unan entre sí. También se pueden unir mediante cremallera.

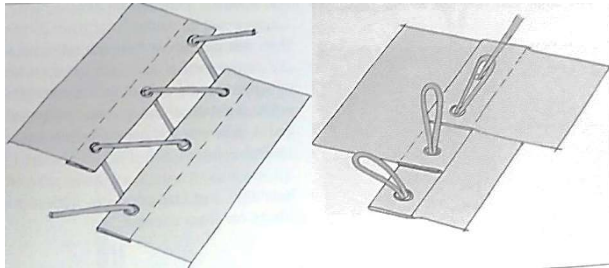


Imagen 5.4.3.6. Unión entre textiles mediante cordón.

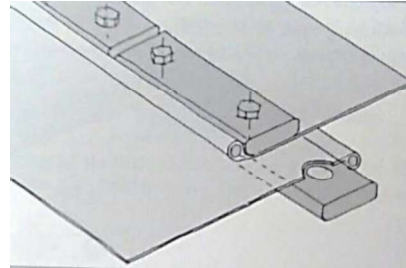


Imagen 5.4.3.7. Unión entre textiles mediante pletinas.

- **Piezas especiales unión al soporte**

A la hora de conectar la estructura con el terreno, hay que solucionar tanto la llegada de mástiles como la de los cables, al tratarse fundamentalmente de elementos metálicos, se recurre a placas de base para solucionar dicho encuentro; sin embargo, atendiendo a las características del encuentro las podemos clasificar en placas de base de mástil, los cuales pueden ir directamente unidos a la placa base con soldadura, usando cartelas para rigidizar la unión; mediante un elemento bisagra o mediante bisagra de bola peraltada.

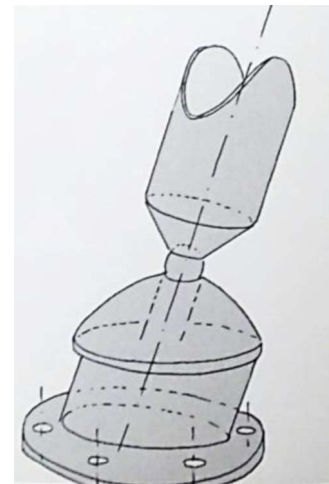
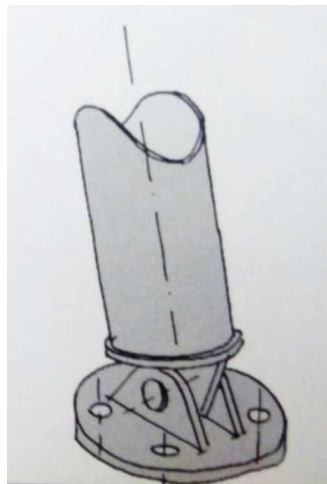
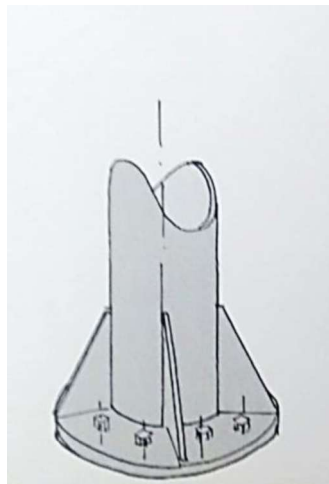


Imagen 5.4.3.8. Soportes para mástil.

En el caso de los cables, la unión dependerá del elemento de terminación con el que se ha acabado el cable.

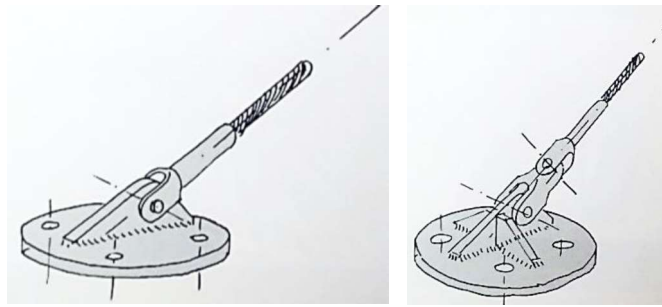


Imagen 5.4.3.9. Soportes de cable.

- Puntos altos

En los conoides, existen unos contornos cerrados en la parte alta, aunque también pueden aparecer en la zona más baja de la estructura según se haya proyectado el conoide. Este elemento tiene perímetro circular necesita de un mástil para su sustentación.

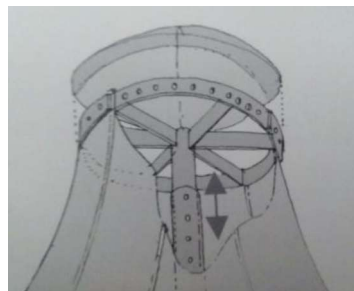


Imagen 5.4.3.10. Elemento de coronación del conoide.

5.4.4. Textiles

El elemento textil, en el caso de las estructuras que estoy desarrollando, tienen carácter estructural además de servir de elemento cubrición y cerramiento, por tanto han de tener una gran resistencia para ello. Como se ha comentado en el apartado “5.2. INTRODUCCIÓN”, el elemento textil debe contar con una doble curvatura para soportar las tensiones a las que se ve sometido.

Los textiles están conformados por varias capas entre las que, como mínimo, se debe encontrar una primera capa, que es la que conforma el tejido, y está compuesta por fibras que pueden ser sintéticas, metálicas o minerales, y sobre estas un recubrimiento por las dos caras del tejido, que se elige según las necesidades de diseño y cálculo.

Los tejidos del elemento textil están formados por fibras en dos direcciones, trama y urdimbre. Estas fibras o hilos pueden disponerse de varias formas, ya sea trenzadas (entrelazadas entre sí, que es la que más suele usarse en Europa), laminadas o superpuestas conformando finalmente el tejido. En el caso de las fibras trenzadas, según la fuerza que se aplique en dicho proceso, se variarán las propiedades mecánicas del elemento final. El comportamiento del textil es heterogéneo, ya que no aguanta lo mismo en todas las direcciones.

Este tejido, en principio, no suele ser resistente a la intemperie, por tanto, es necesario colocar un material de recubrimiento por las dos caras del mismo, lo que contribuye a mejorar su durabilidad y comportamiento tanto a la intemperie como a protegerlo en caso de incendios (aunque en general estos materiales no suelen comportarse bien ante la acción del fuego, mejoran las características del tejido de base) y frente a la suciedad. Además de esto, con estos revestimientos se pueden conseguir distintos acabados, que pueden ir desde acabados tipo rejilla como acabados opacos, de un color liso e incluso con motivos, según el material que se use para el recubrimiento, siendo el PVC el más flexible en este sentido. Algunos de estos materiales son el PVC (Policloruro de vinilo), Silicona y PTFE (Polietrafluoretileno), habiendo mucha más variedad.

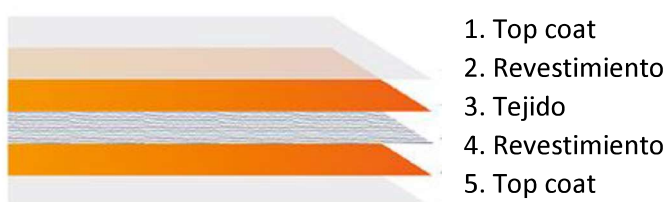


Imagen 5.4.4.1. Capas del textil

Por otra parte, también existe la posibilidad de usar elementos de hoja continua como son el Policloruro de vinilo (PVC), el Polietileno, el Poliéster (PES), el Polímero de Fluoretileno (FEP) y el Copolímero de Etileno y Tetrafluoretileno (ETFE), este último tiene acabado translúcido.

Analizando las soluciones utilizadas en las casas comerciales que trabajan las estructuras textiles actualmente, he podido comprobar que pese a la variedad de textiles a los que se puede recurrir, en la actualidad los textiles más utilizados son los de Poliéster/Policloruro de vinilo (PVC), Fibra de vidrio/Silicona, Fibra de vidrio/Teflón (PTFE) y ETFE.

5.4.5. Patroneado

Los elementos textiles, como ya se ha señalado en puntos anteriores, necesitan de una doble curvatura para trabajar de forma correcta, es decir, las superficies que hay que formar son complejas. Esto unido a las dimensiones que han de tener los elementos textiles, hacen que sea necesaria la previsión y definición del desarrollo plano de la membrana, de lo que se obtendrán las distintas piezas que, al unirse, formarán la superficie del textil, para obtener estas piezas hay que recurrir al patroneado de las mismas.

Para cada caso no existe una única solución, sino que el proyectista tiene que optar por aquella que le resulte óptima en cada situación. En elementos complejos se suele recurrir a la triangulación, recurriendo a la interpolación lineal en los casos que sea necesario.

5.5. Detalles constructivos

A continuación, mostraré una recopilación de posibles soluciones constructivas que se pueden dar solución a las estructuras textiles.

En la imagen inferior, se muestra una solución completa de estructura, que combina el apoyo del mástil con un elemento de bisagra que lo une a la placa base, que se encuentra embebida en la cimentación. El cable usado para la colocación de los vientos, se une a la placa base de cimentación mediante bisagra, usando elementos terminales en horquilla tanto en esta posición como en la unión entre el cable y el mástil. La eslinga de la membrana es de tipo cable con terminal prensado con casquillo, y unida al mástil mediante un elemento tipo gancho. Esta solución se puede usar tanto en estructuras apuntaladas como en los elementos en eslinga de la estructura mixta.

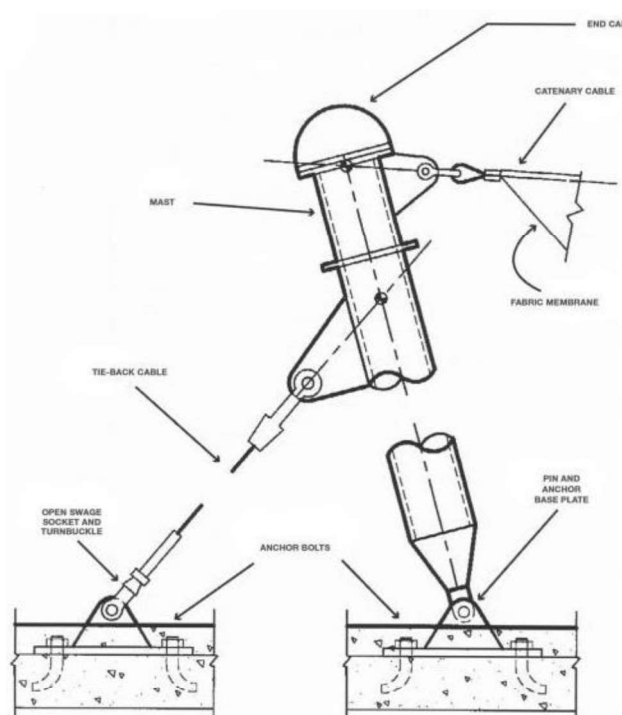


Imagen 5.5.1. Unión mediante bisagras y elementos en horquilla.

En las siguientes imágenes se muestra el encuentro entre dos eslingas y de estas el soporte. Para esta solución se usan una serie de elementos auxiliares de pletinas que solucionan el encuentro entre los cables y los elementos en espiga con los que se unen al soporte. En ambas imágenes se muestra el uso de terminales en espárrago en los cables de borde de las eslingas. Por último la unión entre el elemento placa del textil y el soporte es mediante horquilla.



Imagen 5.5.2. Encuentro de dos eslingas



Imagen 5.5.3. Encuentro de dos eslingas

A continuación se muestra la solución de un vértice de una estructura de tipo mixto, a ella llegan dos tipos de borde. En un sentido, existe un elemento tubular que hace de borde rígido estructural, sobre este se encuentran soldadas unas pletinas longitudinales entre las que se embebe la membrana, uniéndose las pletinas entre sí mediante elementos de tornillería. En el otro sentido la membrana acaba en eslinga, la cual se soluciona mediante un cable oculto, que cuenta con un elemento prensador y un terminal en horquilla,



Imagen 5.5.3. Solución mixta

5.6. Nociones para la comprobación geométrica

Aunque en este momento no es posible el desarrollo del cálculo de este tipo de estructuras, es preciso señalar una serie de nociones sobre las comprobaciones de la viabilidad de este tipo de estructuras mediante unos cálculos elementales de las tensiones. Estos cálculos los he extraído de los apuntes de clase de la asignatura de Estructuras Especiales, del curso 2017/2018.

Las fórmulas fundamentales en las que me basaré a la hora de comprobar las propuestas que realizaré en el punto “8. PROPUESTAS GEOMÉTRICAS PARA EL PATIO DE LA ETSA”.

- Antes de empezar, es preciso señalar que para que la relación de la flecha entre la luz tenga un valor óptimo, esta tiene que ser inferior o igual a 0,2. Sin embargo, si el valor de esta relación se acerca demasiado a 0,1, esto indica que la estructura tiene poco alabeo.
- Partiendo de unos datos iniciales de viento en presión y en succión, en el caso del cálculo tomaré de forma estimada los mismos valores que utilizamos en la práctica de la asignatura de Estructuras Especiales ($q_p = 1 \text{ kN}$ y $q_s = 0,75 \text{ kN}$), y habiendo obtenido los valores de flecha y luz en las dos familias de parábolas que forman la superficie, se podrá proceder al cálculo de los tres estados de carga posibles.
- En primer lugar, se calculará la COMBINACIÓN 1, que es la debida al pretensado, las fórmulas que habrá que utilizar son las siguientes:

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} \quad H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 \quad T_2 = 1,3 \cdot H_2$$

- A continuación, hay que calcular la COMBINACIÓN 2, que es la que se produce por la presión, en la que:

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} \quad H_2 = 0$$

- Por último, la COMBINACIÓN 3, que es la producida por la succión del viento.

$$H_1 = 0 \quad H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8}$$

Siendo: $q_1 + q_2 = q_p$

q_p = presión del viento

q_s = succión del viento

l_1 y l_2 = luz de la parábola

f_1 y f_2 = flecha de la parábola

H_1 y H_2 = Tensiones internas del textil en cada dirección

T_1 y T_2 = Tensiones de borde

- Una vez se han calculado las tres combinaciones, se escoge el mayor valor de tensiones obtenido, y en función de esto se elige un textil que soporte dichas tensiones.

A la hora de ajustar una malla, lo óptimo es que la flecha que se produce en las dos familias de curvas sea similar. Además, en el caso de existir relingas, cabe señalar que las relingas que estén sometidas a menores tensiones, nos darán mayores curvaturas que las sometidas a mayores tensiones, en los que aparecerán curvaturas más amplias.

6. Clasificación de las estructuras enmarcadas y mixtas

Pese a que en el punto “5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS TEXTILES EN TRACCIÓN” se han clasificado las estructuras textiles en función a los tres grandes grupos que existen, es necesario hacer una clasificación de las estructuras enmarcadas y de tipo mixto, ya que son las que se están estudiando en este caso, atendiendo a su geometría. Esta clasificación servirá como base fundamental para el posterior análisis y desarrollo de los casos de estudio.

6.1. Estructuras enmarcadas

En este caso se recogen distintas soluciones geométricas en el uso de elementos de borde rígido.

- **Estructuras de borde “continuo”** en las que mediante la disposición del propio borde se fuerza la doble curvatura. Con ello se puede obtener la forma de paraboloide hiperbólico, ya sea de forma continua o truncada, como se muestra en las siguientes imágenes:

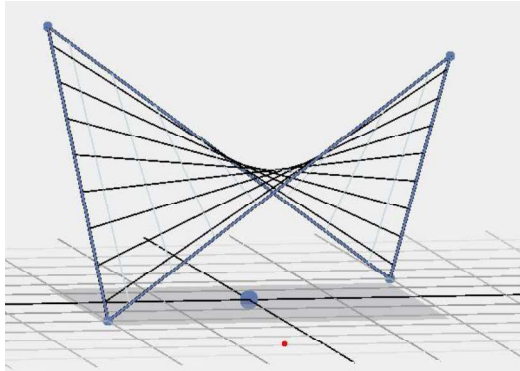


Imagen 6.1.1. Paraboloide hiperbólico equilátero

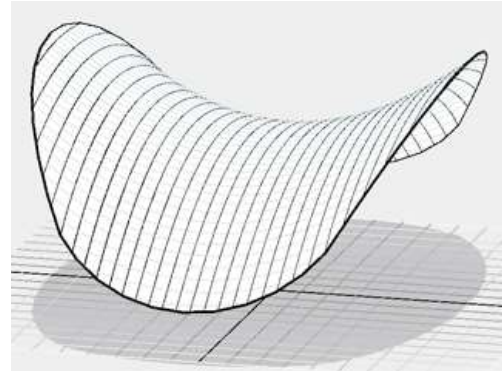


Imagen 6.1.2. Paraboloide hiperbólico con bordes ondulados

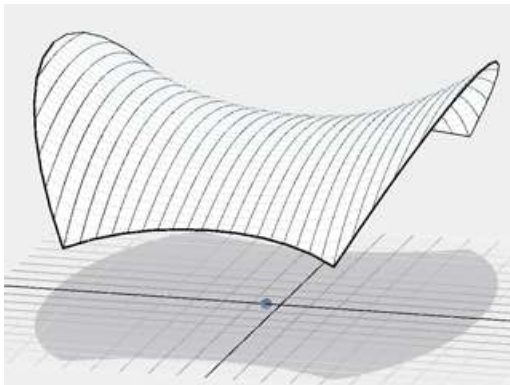


Imagen 6.1.3. Paraboloide hiperbólico con bordes ondulados truncado

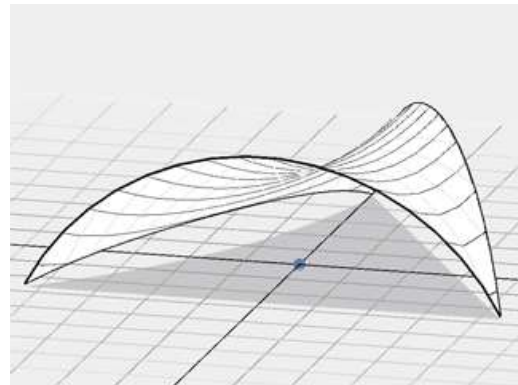


Imagen 6.1.4. Paraboloide hiperbólico truncado por tres arcos

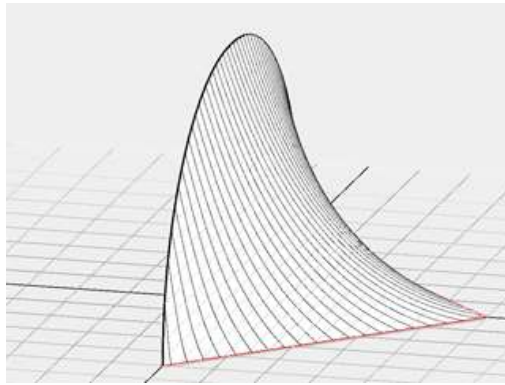


Imagen 6.1.5. Paraboloide hiperbólico truncado por arco vertical y bordes inferiores rectos

- Otra forma de conseguir este tipo de estructuras es recurriendo a elementos de borde en todas sus aristas, pero incluyendo además otros elementos tipo **arco** en zonas **interiores** de la estructura. Con esto se puede conseguir, en caso de que se quiera, que todo el perímetro esté a la misma altura elevando las zonas próximas al arco, y propiciándose de este modo la doble curvatura.

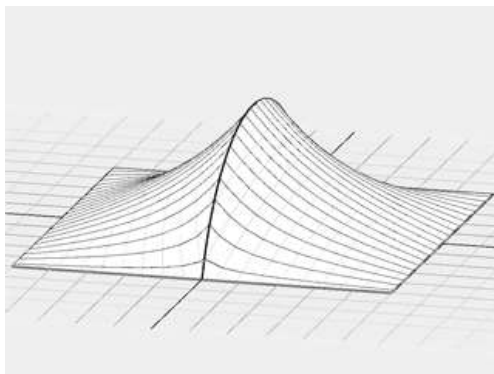


Imagen 6.1.6. Superficie enmarcada por aristas rectas y arco central.

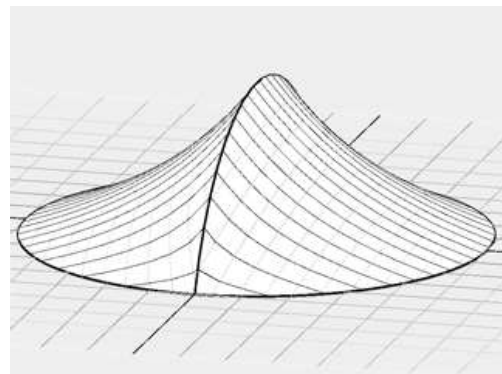


Imagen 6.1.7. Superficie enmarcada por perímetro circular y arco central.

- **Conoides.** Se trata de superficies con un perímetro inferior que puede estar conformado por aristas rectas o curvas, y en el que existe un elemento rígido interior más elevado, y entre estas piezas se forman las superficies alabeadas. También puede presentarse en forma de conoide inverso, que consistiría en colocar la parte de menor dimensión en la parte baja.

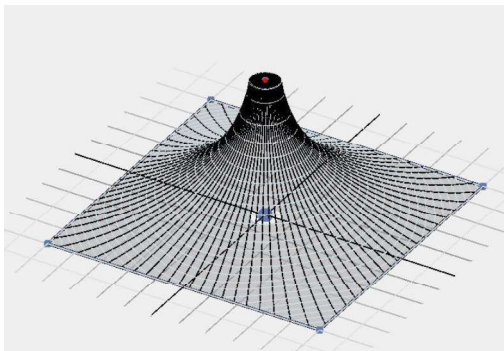


Imagen 6.1.8. Conoide con perímetro recto

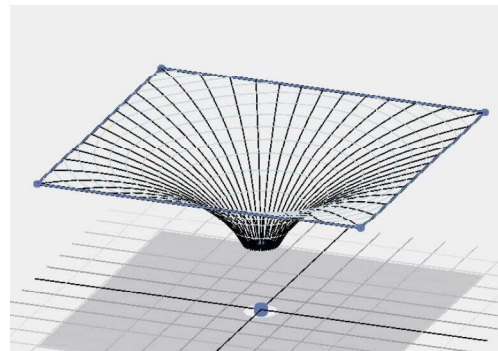


Imagen 6.1.9. Conoide invertido con perímetro recto

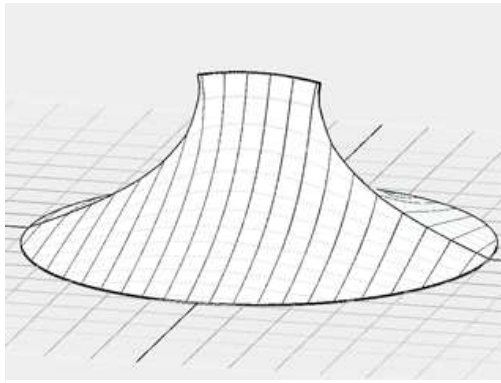


Imagen 6.1.10. Conoide con arco en la zona de coronación.

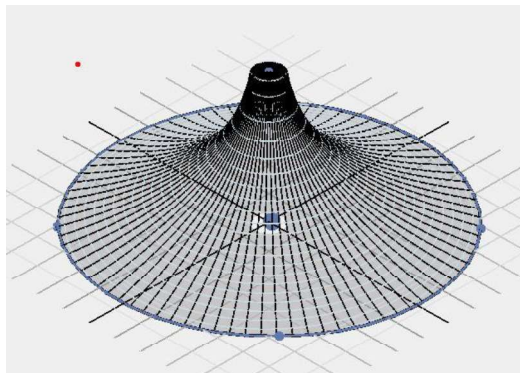


Imagen 6.1.11. Conoide con borde curvo.

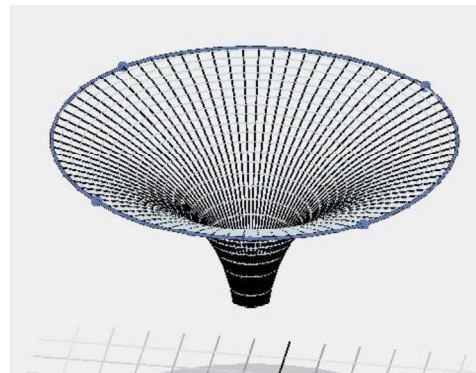


Imagen 6.1.12. Conoide invertido con borde curvo.

- Por último, otra opción para conseguir este tipo de estructuras es la **repetición modular** de las superficies propuestas anteriormente.

6.2. Estructuras mixtas

En este caso, las geometrías son similares a las propuestas en el punto anterior, con la variante de que algunos de las aristas pasan a estar conformadas por eslingas, teniendo por tanto curvatura.

- Variación del **paraboloide hiperbólico**. Combinando elementos en arco de borde rígido, con o sin inclinación, con elementos en eslinga.

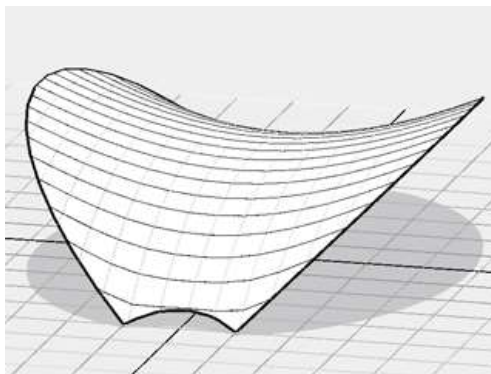


Imagen 6.1.13. Estructura mixta en paraboloide hiperbólico con arcos inclinados.

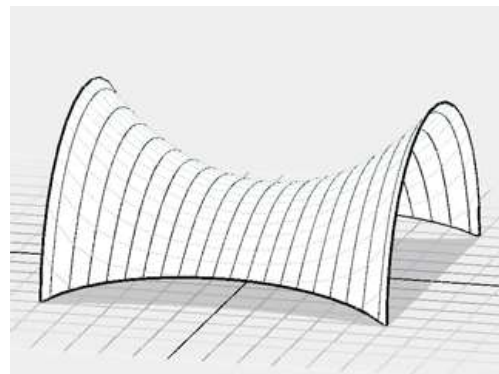


Imagen 6.1.14. Estructura mixta en paraboloide hiperbólico con arcos rectos.

- Variación del uso del **arco central**, combinando la propuesta de superficie enmarcada con las eslingas, o bien usando como elemento rígido únicamente el arco y solucionando con eslingas todo el perímetro.

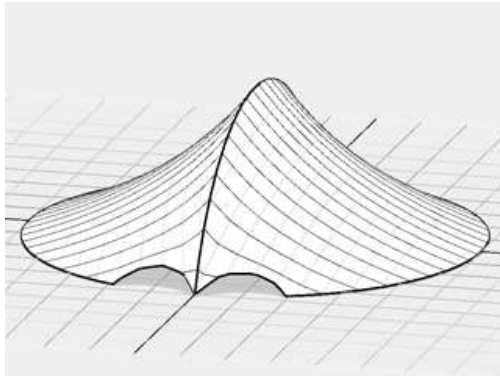


Imagen 6.1.15. Estructura mixta con bordes curvos y arco intermedio.

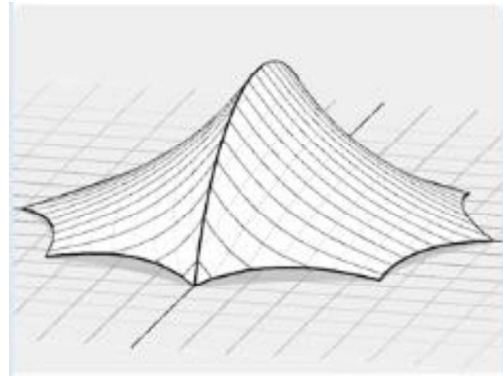


Imagen 6.1.16. Estructura mixta con bordes en eslinga y arco intermedio.

- Variación del conoide

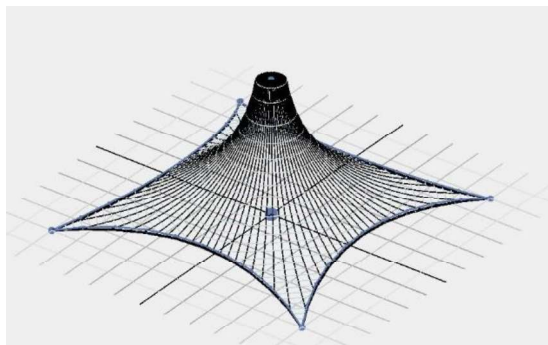


Imagen 6.1.17. Conoide

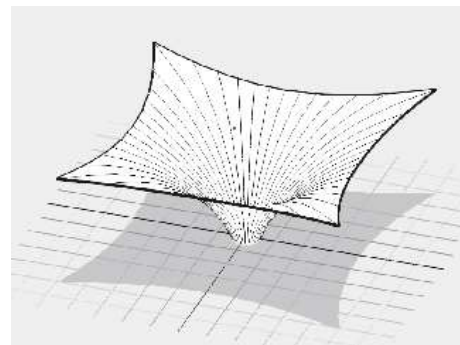


Imagen 6.1.17. Conoide invertido

- Repetición modular.

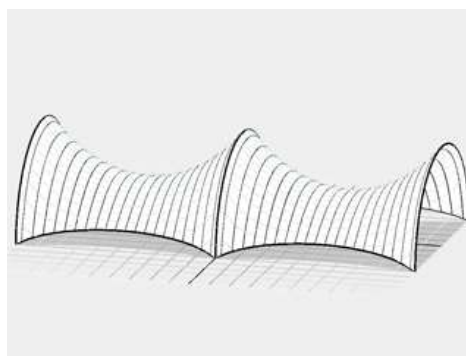


Imagen 6.1.19. Repetición modular de estructura mixta.

7. Casos de estudio

A fin de concentrar todos los conceptos analizados en los puntos anteriores, voy a realizar el estudio de casos concretos de estructuras ya construidas de tipo borde rígido o enmarcado y de tipo mixto.

En primer lugar, realizaré el estudio de 11 casos de estructuras enmarcadas y, a continuación, realizaré el estudio de 5 estructuras de tipo mixto, puesto que estas parten de la combinación de las de borde rígido eliminando el elemento rígido.

Los materiales que aparecen en las fichas responden a la siguiente nomenclatura:

- **PES:** Fibra de poliéster.
- **PVC:** Policloruro de vinilo.
- **PVDF:** Polifluoruro de vinilo
- **PTFE:** Polietrafluoretileno.
- **ETFE:** Copolimero de etileno y tetrafluoretileno.

PARQUE IGERAIN GAIN

GO4ZEN ARCHITECTS

Arquitecto: Go4zen Architects

Ubicación: Zarautz, Guipúzcoa (España)

Año Const: 2017

Superficie: 580m²

Textil: Tejido PES/PVC + ETFE

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Espacio urbano- Zona de juegos

Tipo: Borde Rígido

Descripción

Se trata de una estructura situada en el parque Igerain Gain, en Guipúzcoa. Está pensada como un elemento de cubierta para dar sombra a la zona de juegos infantiles.

La estructura es de tipo enmarcado, sus lados de menor longitud son de directriz recta, así como los elementos "viga" que se colocan uniendo los soportes simétricos, usándose para ello perfiles tubulares de sección redonda. En la directriz longitudinal, los bordes rígidos se curvan recurriendo a formas que recuerdan a las siluetas de las olas, utilizando en este caso perfiles de sección cuadrada.

Se usan mástiles de distintas alturas, adaptándose a la cota de apoyo de los bordes correspondientes. Esta geometría se corresponde con la del paraboloides hiperbólico, encontrándose éste truncado y colocado de forma seriada, adaptándose a su posición.

En cuanto al textil, cabe señalar que en esta obra se han usado dos tipos de textil. En primer lugar, la membrana usada en la lona tensada que cubre el espacio está formada por un tejido de fibra de poliéster (PES) recubierta con PVC en ambas caras. Al ser el PVC un revestimiento que admite distintos tipos de acabado, se ha optado por un acabado blanco liso por la parte superior de la membrana, y un recubrimiento en la parte inferior de la membrana en la que se han grabado una serie de motivos a modo de decoración. Por otra parte, en el lateral de la estructura, se usa el ETFE monocapa transparente en la cara norte, a fin de aportar protección contra el viento y la lluvia lateral. En el caso de la lona de PES/PVC, el elemento textil se aprisiona directamente en los perfiles y en el caso del ETFE, se soluciona mediante el uso de cordones auxiliares con los que se cose a los perfiles. El patroneado está compuesto por elementos rectangulares con uniones soldadas.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

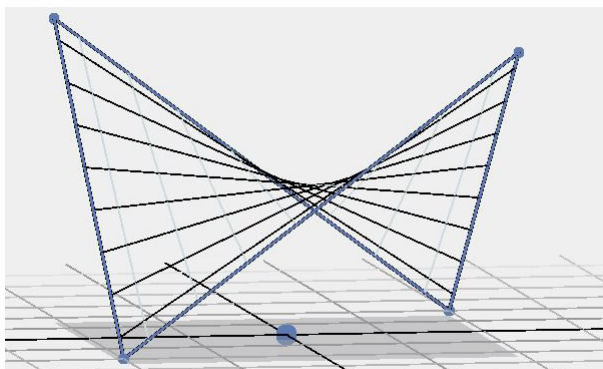
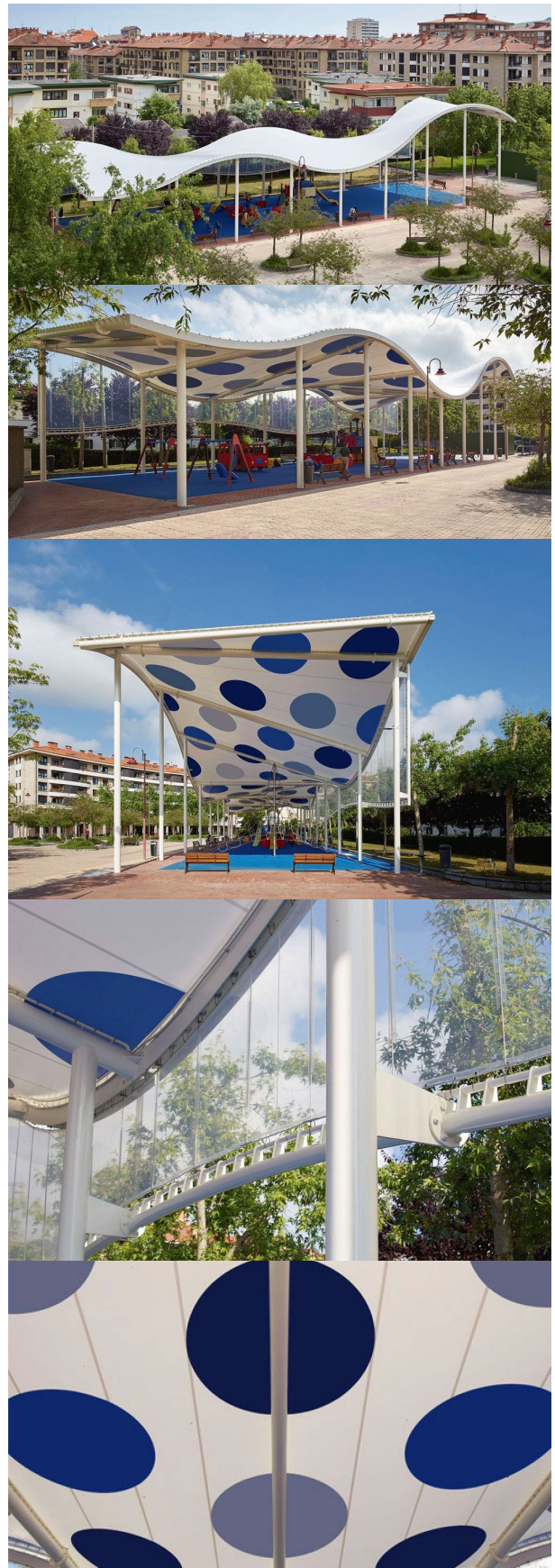


Imagen 6.1.1. Paraboloides hiperbólico equilátero



Imágenes 7.1. Parque Igerain Gain.

VILLAGE DES MARQUES DE MIRAMAS

MARSEILLE ARCHITECTURE PARTENAIRES

Arquitecto: Maeseille Architecture Partenaires
Ubicación: Miramas, Provenza-Alpes-Costa Azul
Año Const: 2017 (Francia)
Superficie: 480m² (24mx24mx22mx17m aprox.)
Textil: Tejido PES/PVC
Material Estructural: Acero
Tipo de uso: Centro comercial-Zona de juegos
Tipo: Borde Rígido

Descripción

La Village des Marques de Miramas, es un centro comercial, situado en Miramas (Francia), en el que se ha construido la estructura de las imágenes, para resolver la cubierta de una zona de juegos infantil.

En este caso, la geometría se corresponde con la de un conoide con los bordes inferiores rectos, y la corona superior sobre un mástil de acero galvanizado que se eleva 15 m desde la cota del suelo, cabe señalar que el mástil es un perfil hueco de sección redonda que se encuentra empotrado en el suelo, aprovechándose el interior de este como paso del cableado eléctrico.

En primer lugar, cabe señalar que el recinto está delimitado por pilares y vigas de hormigón en dos de sus caras y en otras dos se encuentra cerrada mediante muros. A estos elementos de viga, se le anclan perfiles metálicos UPE, que constituyen el borde rígido de la estructura.

El textil usado para la resolución de la membrana está conformado por fibra de poliéster y PVC, siendo blanco el acabado por ambas caras. Por las dimensiones de la membrana, se han colocado cuatro cables diagonales a fin de prevenir las deformaciones provocadas por el viento, así como las acumulaciones de agua sobre la superficie.

La membrana textil queda embebida en los perfiles de acero, y el patroneado que usado sigue la lógica de las tiras en el sentido de la pendiente, que van desde la corona superior hasta el perímetro inferior. Los trozos componentes de la lona se encuentran soldados.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

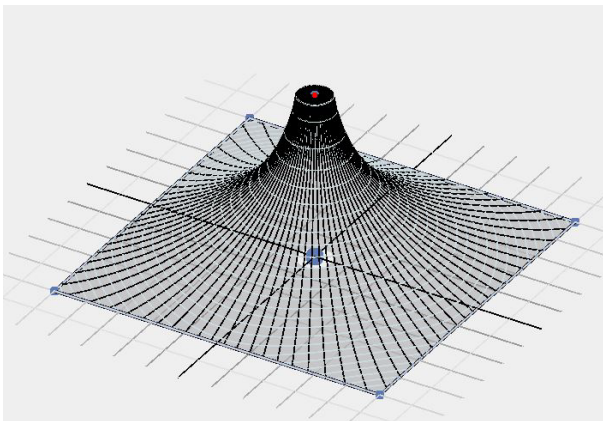


Imagen 6.1.8. Conoide con perímetro recto



Imágenes 7.2. Village des Marques de Miramas.

APARCAMIENTOS AEROPUERTO SEVILLA

FHECOR

Ingenieros: Fhecor

Ubicación: Sevilla (España)

Año Const: 2011

Superficie: 9.635m²

Textil: Ferrari Precontraint 702 s

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta de aparcamiento

Tipo: Borde Rígido

Descripción

Los aparcamientos del aeropuerto de Sevilla, son un ejemplo claro de la repetición seriada de una misma superficie, siendo la base de la seriación el paraboloide hiperbólico.

En este caso, la estructura parte de una serie de pilares equidistantes de perfiles huecos de acero con sección circular, a partir de los que salen una serie de vigas, también de sección circular, y que cuentan con cierta inclinación y hacen las veces de borde de la estructura en el sentido transversal de la misma. En el sentido longitudinal, se disponen las mismas vigas pero de forma paralela al eje longitudinal, estas vigas se encuentran en voladizo, y conforman parte del perímetro que enmarca la membrana.

Los mástiles usados son de la misma altura, pero sobre estos acometen las vigas a distintas alturas. Este juego de cotas provoca la curvatura final de la superficie.

En cuanto al elemento textil, se especifica que se ha colocado el "Ferrari Precontraint 702s". Se trata de una lona compuesta por un tejido de fibra de poliéster (PES) con recubrimiento de PVDF (polifluoruro de vinilo) en ambas caras.

Al estar compuesta la superficie de la membrana por piezas pequeñas e independientes, el patroneado es escaso. No habiendo sido necesario recurrir a más de dos empalmes de textil por paño, uniéndose entre sí mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

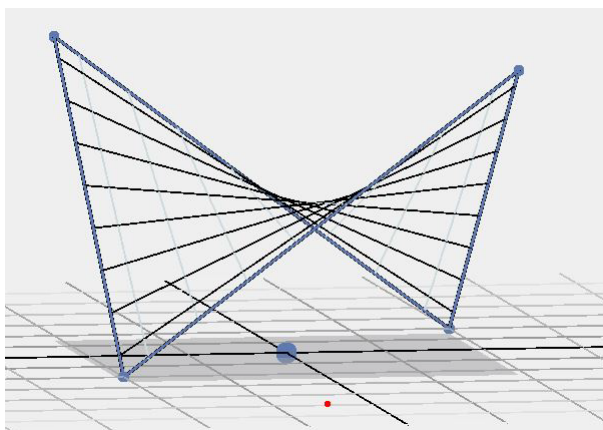


Imagen 6.1.1. Paraboloide hiperbólico equilátero



Imágenes 7.3. Aparcamientos del aeropuerto de Sevilla.

CUBRICIÓN DE PARQUES CARPLUS

PEDRO BALONAS

Arquitecto: Pedro Balonas

Ubicación: Gaia, Oporto (Portugal)

Año Const: 2000

Superficie: 6.000m² (30x200 m²)

Textil: Ferrari Precontraint 1002

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta de aparcamiento

Tipo: Borde Rígido

Descripción

En las imágenes se muestra la propuesta de cubrición del parque Carplus, la cual consiste en la repetición de un mismo elemento a lo largo y ancho de la superficie a cubrir.

La geometría de la estructura se corresponde con un conoide invertido. La estructura al completo se sustenta sobre un mástil de acero de sección circular que se encuentra empotrado directamente en la cimentación, sobre éste y en la cota más baja de la superficie. El borde rígido que cierra la zona superior de la superficie es de directriz circular y sección también circular. Este elemento de borde se sustenta a través de una serie de cables de acero que parten de la zona superior del mástil, sustentando el borde y dándole estabilidad al mismo.

La membrana que se ha usado es la "Ferrari Precontraint 100", la cual está compuesta por un tejido de fibra de poliéster y un recubrimiento de PVC, de acabado liso.

El patronado se ha realizado en el sentido de la pendiente del borde a la corona, uniéndose el textil entre sí mediante soldadura. En la zona de la corona, la membrana entra, sin embargo en la zona del borde se recurre a cordones para realizar la unión.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

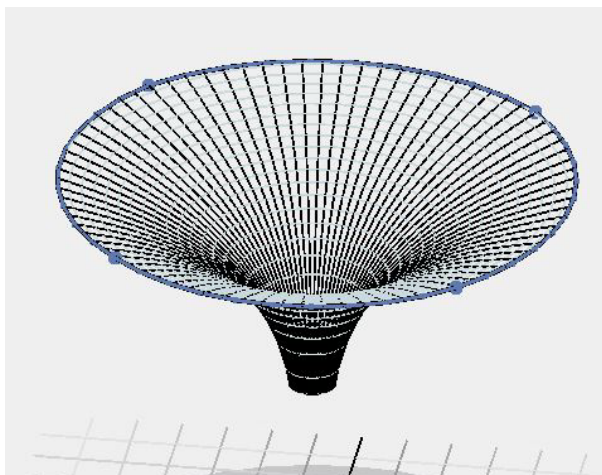


Imagen 6.1.12. Conoide invertido con borde curvo.



Imágenes 7.1. Parques Carplus.

CLUB OLÍMPICO DE GOLF

RUA ARQUITECTOS

Arquitecto: RUA Arquitectos

Ubicación: Barra da Tijuca, Río de Janeiro (Brasil)

Año Const: 2015

Superficie: 6.400m²

Textil: -

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta campo de golf

Tipo: Borde Rígido

Descripción

La cubierta del club olímpico de golf de Barra da Tijuca (Brasil), está compuesta por 14 módulos idénticos colocados de forma seriada en torno a un núcleo construido.

La geometría de los módulos se corresponde con la de una pirámide invertida truncada. La estructura es sustentada por mástiles colocados en el centro de cada módulo, sobre los que se articula todo un entramado reticular de perfiles metálicos que hacen las veces de borde rígido de la estructura, estos se sustentan en puntos concretos gracias a unos perfiles inclinados que conectan con el mástil todos los puntos del entramado donde aparecen nudos.

Los mástiles se resuelven con perfiles tubulares de sección circular, a los que acomete en su punto más alto la corona de la pirámide invertida, así como los perfiles que van a los nudos del entramado. Tanto estos últimos como los perfiles que forman el entramado son de sección rectangular. Para mantener la estabilidad del entramado se recurre a cables que arriostran estos elementos entre sí.

El patroneado de cada módulo se ha hecho dividiendo cada una de las cuatro caras del mismo en seis trozos, formando polígonos de cuatro lados. La unión entre estos polígonos se hace mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

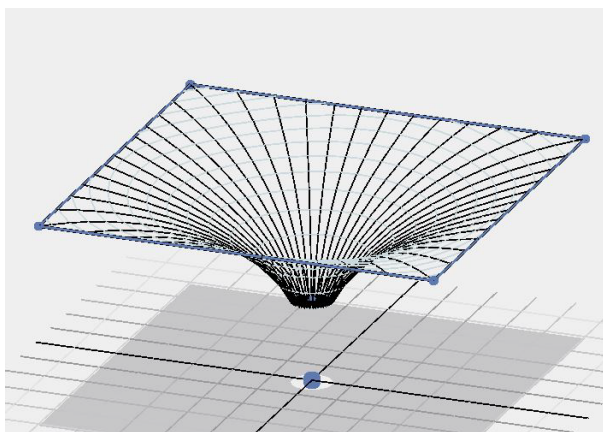
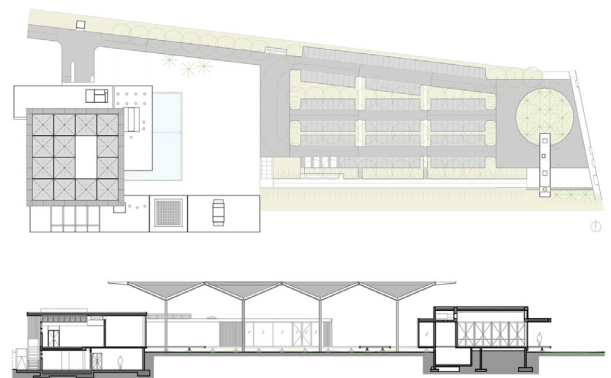
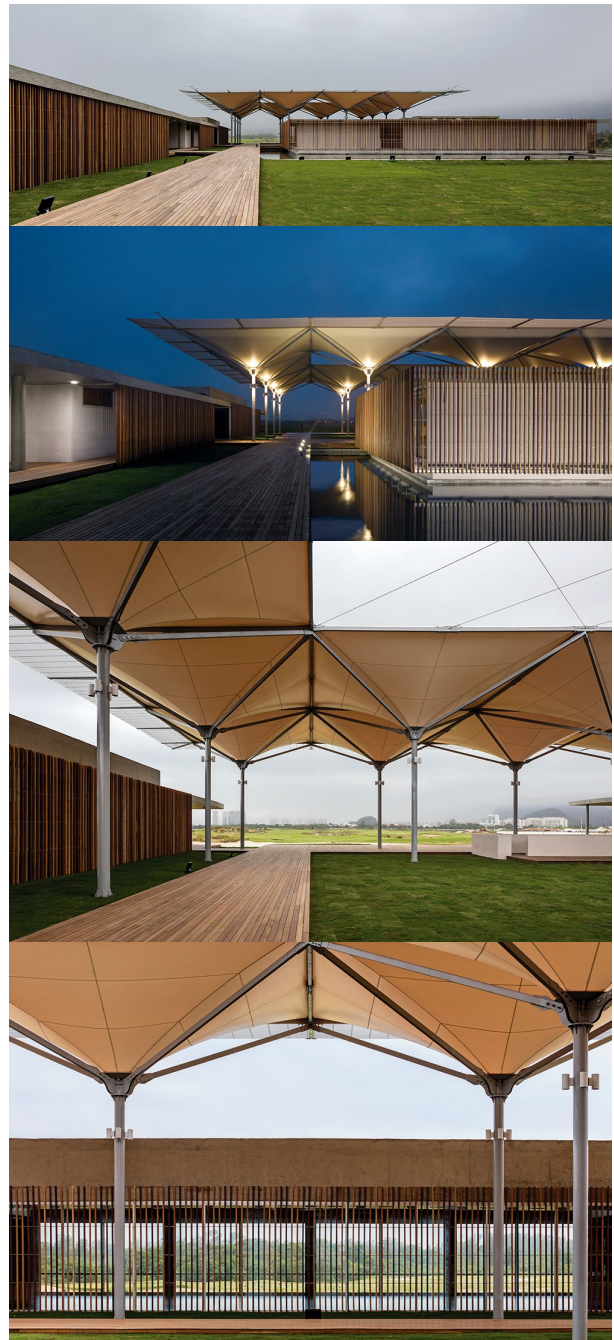


Imagen 6.1.9. Conoide invertido con perímetro recto



Imágenes 7.5. Club olímpico de golf.

CENTRO DE ARTE DE TAIWAN

MAYU ARCHITECTS Y ARCHITEKTEN CIE

Arquitecto: Mayu Architects y Architekten Cie

Ubicación: Kaohsiung City (Taiwán)

Año Const: 2012

Superficie: 36.470m²

Textil: –

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Centro de arte

Tipo: Borde Rígido

Descripción

El Centro de Arte de Taiwán, se concibe como un espacio destinado al ocio, y se busca el confort de los ocupantes, por tanto, a la hora de diseñar la estructura textil, los arquitectos han tenido en cuenta las condiciones extremas que se pueden presentar, como los tifones, las lluvias e incluso las altas temperaturas. Cada uno de los huecos circulares existentes en el textil, coinciden con una geometría que se proyecta de forma idéntica sobre el suelo. Estas aberturas se diseñan enfocándose a la eliminación del aire caliente, manteniendo una menor temperatura en el interior.

La geometría se basa en la inserción de 11 conoides de base poligonal, cuyos perímetros varían entre sí, es decir, no se trata de un módulo con las mismas direcciones. Estos conoides se resuelven mediante un elemento de acero superior formando una parrilla que hace de bordes rígidos, dentro de los cuales entra la lona. Estos bordes se encuentran sustentados por una serie de mástiles, situados en los nudos del entramado y en los puntos medios de los elementos de borde, estos mástiles son muy esbeltos y de menor sección que los bordes. En cuanto a la parte inferior del conoide, se resuelve mediante una corona de gran diámetro.

El patroneado se hace mediante trozos de textil que van de los bordes a la corona en el sentido de máxima pendiente, y en general se unen mediante soldadura.



GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

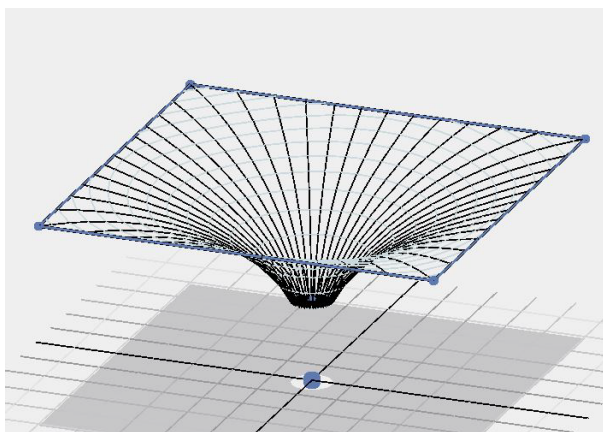
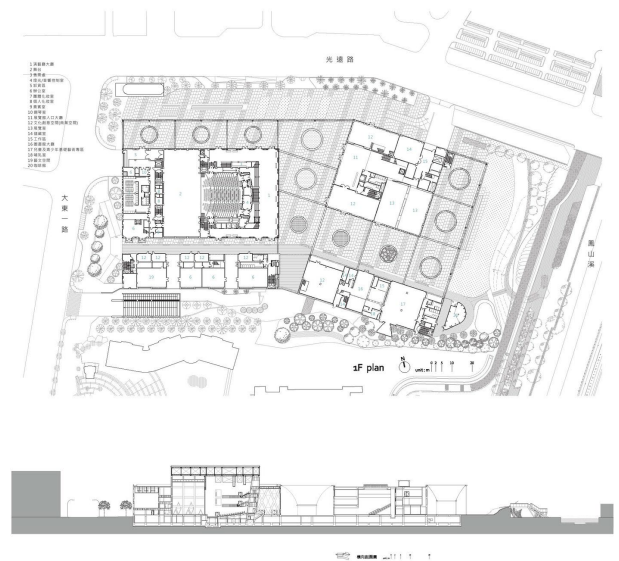


Imagen 6.1.9. Conoide invertido con perímetro recto



Imágenes 7.6. Centro de arte de Taiwán.

CENTRO COMERCIAL DOWNTOWN

AALTON PARTNERS

Ingenieros: Aalton Partners

Ubicación: Summerlin, Nevada (EEUU)

Año Const: 2014

Superficie: 5.550m²

Textil: PTFE/ETFE

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta centro comercial Downtown

Tipo: Borde Rígido

Descripción

En el caso del centro comercial Downtown, se ha recurrido a estructuras independientes. Una primera estructura central de forma piramidal sostenida sobre un mástil, y cuyo borde inferior está compuesto por un elemento en celosía de acero. En este caso se utiliza el ETFE en la zona de la punta superior de la pirámide, pero el resto del textil usado es del tipo PTFE. El patroneado de la pirámide es relativamente sencillo, similar al recogido en la ficha nº 5, pero con un mayor número de divisiones.

Además de la pirámide, existen otros elementos en los que el borde curvo fuerza la geometría de paraboloides hiperbólicos, para rigidizar y sostener este borde, existe todo un entramado, también curvo, que se une al mástil tubular mediante unos también tubulares que van a ciertos nudos del entramado. Todos los perfiles usados para resolver estas estructuras son de sección circular, aunque de distintos diámetros. El textil usado en la lona de estas estructuras es el PTFE. Por último, es necesario señalar que en este caso se ha recurrido a un patroneado más complejo, por los cambios de curvatura de la superficie. Las unidades de lona se unen por soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

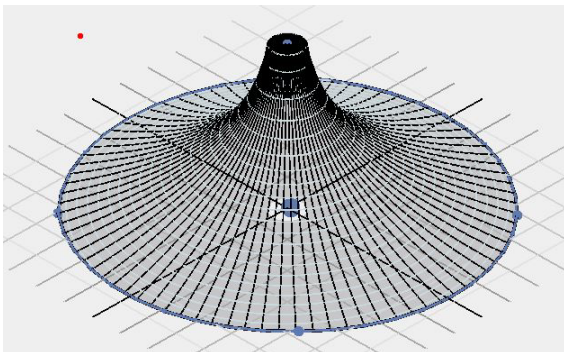
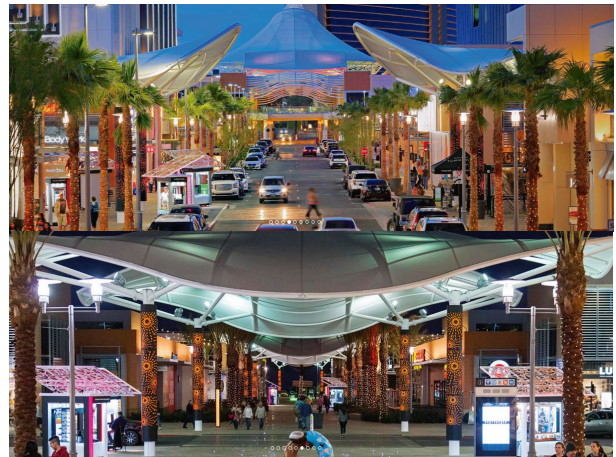
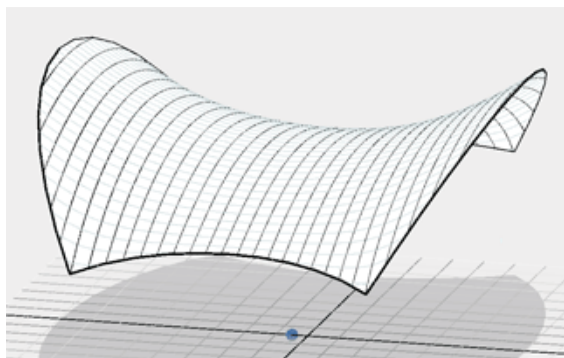


Imagen 6.1.11. Conoide con borde curvo.



Imágenes 7.7. Centro comercial Downtown.

DOSEL DE PEATONES DEL WESTERN DIGITAL CAMPUS

PETER VATKOV

Arquitecto: Peter Vatkov

Ubicación: Fremont, California (EEUU)

Año Const: 2016

Superficie: 437m²

Textil: PTFE

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta de aparcamiento

Tipo: Borde Rígido

Descripción

El Western Digital Campus en Fremont, California, se proyecta como una cubierta para dar sombra al recorrido peatonal que une los edificios del campus.

Para conformar la geometría se recurre al paraboloide hiperbólico. Cada paño delimitado por cuatro bordes rígidos conforma un hypar.

El soporte de la estructura se lleva a cabo mediante una serie de mástiles, empotrados en el terreno, los cuales se encuentran desplazados respecto a las zonas centrales. A partir de estos mástiles, salen unos elementos auxiliares inclinados que sirven de sustentación a los elementos de borde, llegando a todos los nudos que se crean al aparecer estos elementos de borde. Estos elementos se unen al mástil mediante unas pletinas que vienen incorporadas de fábrica en ambos elementos, que se atornillan entre sí para proporcionar rigidez. Todos estos elementos, tanto los mástiles, como los elementos inclinados como los bordes, se solucionan con perfiles tubulares de sección circular.

La lona usada es de PTFE, y queda en el interior del marco. Se usa un patroneado sencillo de piezas en la dirección transversal del dosel. Estas unidades se unen entre sí mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

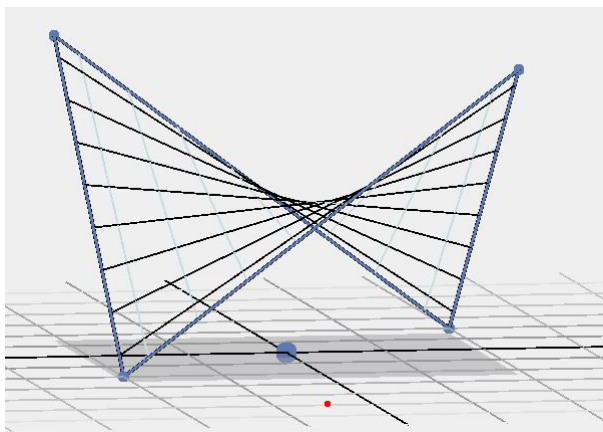


Imagen 6.1.1. Paraboloide hiperbólico equilátero



Imágenes 7.8. Western Digital Campus.

BUSINESS CONFERENCE CENTRE

-

Arquitecto: -
Ubicación: Dallas, Texas (EEUU)
Año Const: 2006
Superficie: 103m²
Textil: PVC
Material Estructural: Acero
Tipo de uso: Centro de conferencias
Tipo: Borde Rígido

Descripción

La entrada al "Business Conference Centre" de Dallas, se soluciona con la seriación de cinco elementos tipo conoide invertido, de las mismas dimensiones. Estos conoides parten de una base cuadrada.

Cada uno de los elementos de la serie se sustenta sobre un mástil de acero de sección circular. Los elementos que forman el marco de la membrana, se resuelven mediante perfiles de sección en U, a los que se ancla la lona.

La membrana se recubre con PVC, y el patroneado se realiza mediante la división de cada una de las caras correspondientes con una división del borde rígido, en dos partes, este corte se realiza de forma perpendicular a la línea de máxima pendiente. Como se observa en las imágenes se recurre a la soldadura para la unión de los distintos paños.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

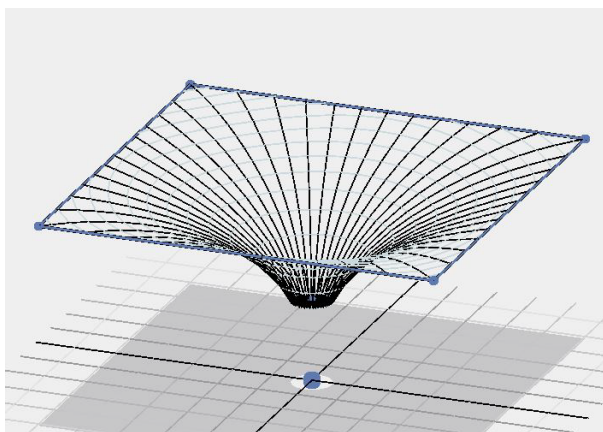


Imagen 6.1.9. Conoide invertido con perímetro recto



Imágenes 7.9. Business Conference Centre.

PABELLÓN DE VOLKSWAGEN

WES LANDSCHAFTSARCHITEKTUR

Arquitecto: WES Landschaftsarchitektur

Ubicación: Wolfsburg (Alemania)

Año Const: 2013

Superficie: 15.000m²

Textil: --

Material Estructural: --

Tipo de uso: Concesionario

Tipo: Borde Rígido

Descripción

El planteamiento base del que surge la cubierta con unas dimensiones tan grandes, es la de proteger todo lo que está bajo ella de las inclemencias meteorológicas y del sol, además de proporcionar una atmósfera privada.

La geometría base parte de un gran paraboloide hiperbólico, que cubre una superficie de 15.000 m², y que solo se conecta al terreno a través de los dos puntos más bajos de la curvatura, estos soportes son de hormigón armado. Las piezas curvadas vienen prefabricadas y preparadas con unas pletinas para ser soldadas entre sí.

En este caso, por las grandes dimensiones del elemento, se ha optado por combinar el uso de la membrana textil con el de la malla de cables, ambos elementos se unen en cada nodo de intersección de la red de cables, lo que ayuda a impedir deformaciones en la membrana textil. En la zona terminal de los cables se usan elementos tipo horquilla, los cuales se unen al marco exterior mediante unas pletinas que vienen soldadas al mismo. El perímetro del textil se encuentra empresillado entre pletinas en todo su perímetro, siendo estas pletinas las que finalmente se unen al marco de la estructura mediante pletinas auxiliares que abrazan un perfil tubular de pequeña sección, que finalmente es el que se une a la estructura portante.

El patroneado es relativamente sencillo, y la unión se realiza mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

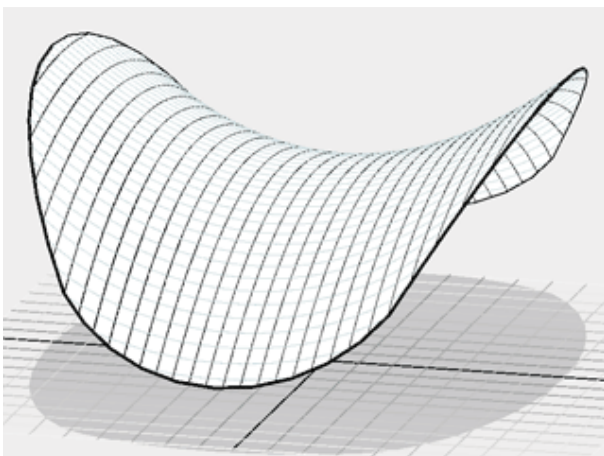
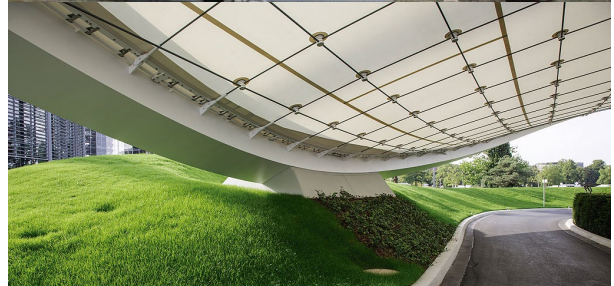


Imagen 6.1.2. Paraboloide hiperbólico con bordes ondulados



Imágenes 7.10. Pabellón de Volkswagen.

PISTA DE PATINAJE "ARENA SCHIERKE"

GRAFT

Empresa: Graft

Ubicación: Schierke, Oberharz (Alemania)

Año Const: 2013

Superficie: 2.400m²

Textil: PTFE

Material Estructural: Anillo de acero+ Red acero

Tipo de uso: Cubierta pista de patinaje

Tipo: Borde Rígido

Descripción

La pista de patinaje "Arena Schierke", se encuentra cubierta por una gran estructura, la cual parte de la colocación de dos arcos inclinados con respecto a la vertical, y que se apoyan en sus dos puntos más bajos en un elemento que transmiten las cargas directamente a la cimentación.

El marco estructural se resuelve mediante perfiles de acero, que se han fabricado con la curvatura prevista para los arcos.

Como en el caso anterior, las grandes dimensiones de las grandes dimensiones de la estructura, surge la necesidad de combinar el uso del textil con una malla de cables de acero. El textil es de PTFE, y el patroneado es relativamente sencillo, puesto que es una geometría recurrente en este tipo de estructuras. La unión de los diferentes patrones se lleva a cabo mediante soldadura.

Los cables forman una malla, que se une con la membrana en cada punto que se intersectan dos cables. Los cables terminan con elementos en horquillas, que se unen a las pletinas previstas en el marco.

El textil se une al borde rígido mediante elementos auxiliares de acero.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

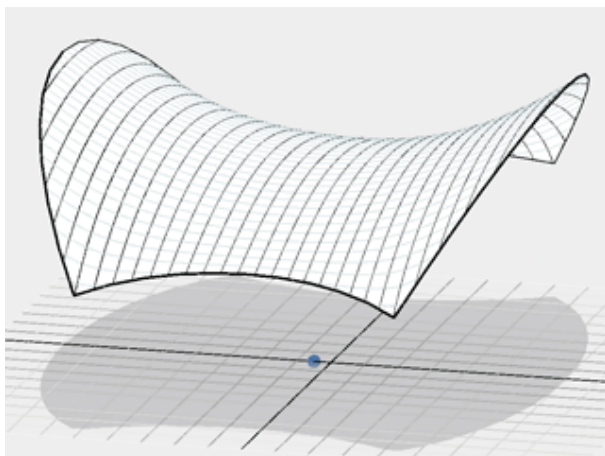
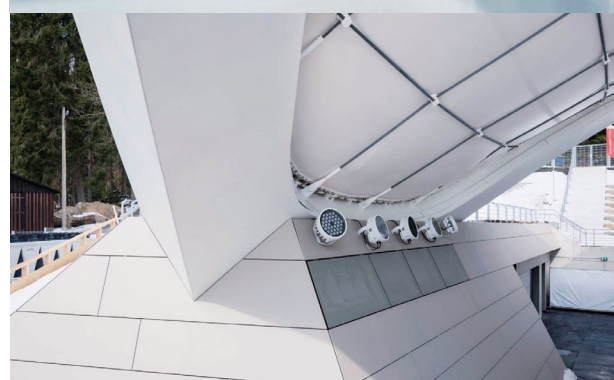


Imagen 6.1.3. Paraboloides hiperbólico con bordes ondulados truncado



Imágenes 7.11. Arena Schierke.

DYNAMIC EARTH CENTRE

MICHAEL HOPKINS & PARTNERS

Arquitecto: Michael Hopkins & Partners

Ubicación: Canongate, Edinburgo (UK)

Año Const: 1999

Superficie: 3.000m² (80 x 35 m)

Tejido: Fibra de vidrio con PTFE

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Centro de interpretación

Tipo: Borde mixto

Descripción

La estructura que cubre el Dinamic Earth Centre, es una estructura textil de tipo mixto, que conforma la cubierta del edificio, combinada con una envolvente vertical de vidrio, llegando a tener una cota de hasta 11 m.

La geometría de la cubierta es basada en una serie de arcos colocados de forma perpendicular a la directriz longitudinal del edificio, y que están resueltos mediante cerchas de acero de dimensiones variables, cuyos huecos se cubren mediante elementos de vidrio.

Estos arcos, que son los que conforman los bordes interiores rígidos de la estructura, están sustentados por dos mástiles cada uno, los cuales sobresalen de la estructura a fin de estar atado por cables de acero a otros elementos de la estructura, lográndose así la estabilidad. Desde cada mástil salen cables que van tanto al elemento arco que tienen que sustentar, como al terreno para ser estabilizado.

Los bordes exteriores de todo el perímetro de la cubierta se solucionan mediante eslingas, las cuales están constituidas por un elemento tipo cable al que se va anclando la membrana.

La membrana es de EFTE, y se recurre en el patroneado a la división en piezas de gran tamaño y cuya directriz sigue el eje transversal de la estructura. Estos patrones se unen mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

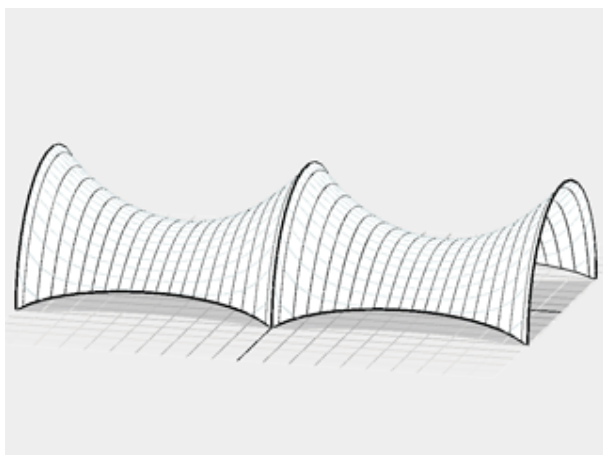
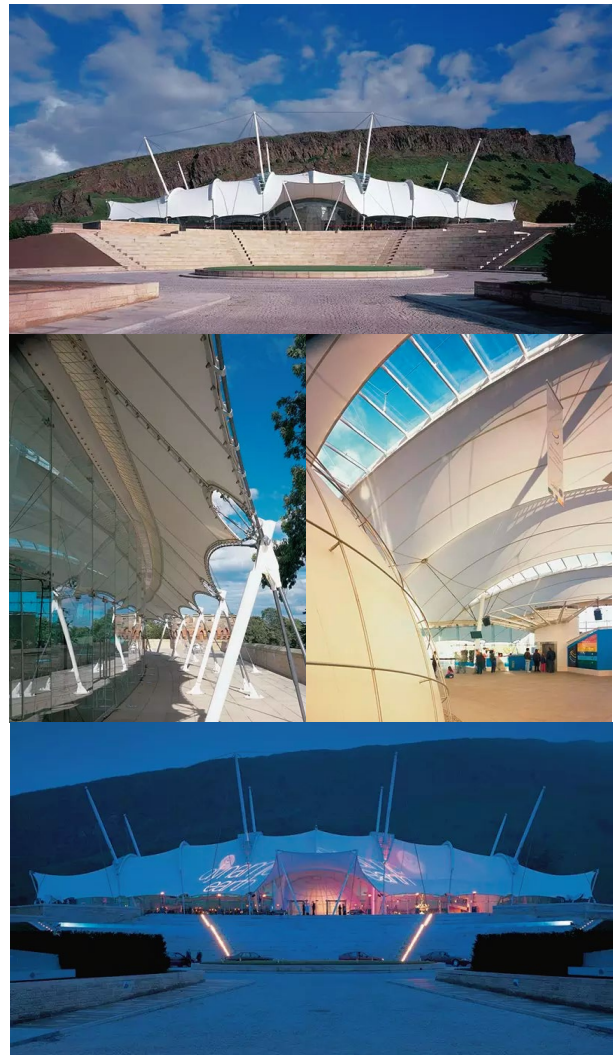
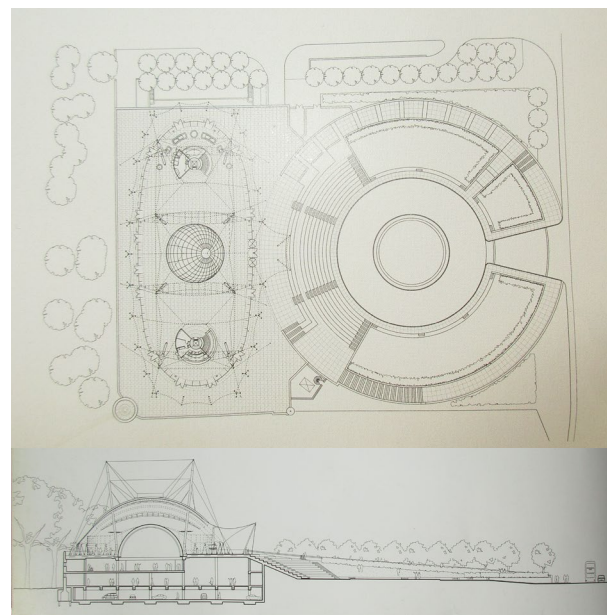


Imagen 6.1.17. Repetición modular de estructura mixta.



Imágenes 7.12. Dynamic Earth Centre.



Imágenes 7.13. Planos Dynamic Earth Centre.

CUBIERTA DEL APEADERO DE LA CARTUJA

LASTRA Y ZORRILLA

Ingenieros: Lastre y Zorrilla

Ubicación: Sevilla (España)

Año Const: 2012

Superficie: 6.990m²

Tejido: PVC

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Cubierta de apeadero.

Tipo: Borde mixto

Descripción

El apeadero de la Cartuja está compuesto por dos materiales principales, el acero y la membrana textil.

La estructura portante se resuelve mediante arcos de acero, que están diseñados como arcos estéreos, conformados con perfiles tubulares de sección circular. Estos arcos se cruzan entre sí, formando los bordes internos rígidos de la estructura, el textil se diseña de forma que cada paño esté delimitado por dos arcos y un borde libre.

La lona usada en la estructura tiene recubrimiento de PVC, y según se observa en las imágenes se ha optado por el patroneado en grandes piezas longitudinales, unidades entre sí mediante soldadura.

El textil se une a los arcos mediante cordones en zig-zag, llevando embebido un cable en todo el perímetro de la lona para evitar las rasgaduras por el cordón. Por otra parte, las zonas con bordes en eslinga llevan el cable por fuera de la membrana, y se atan a ellos mediante elementos auxiliares.



Imágenes 7.14. Apeadero de la Cartuja.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

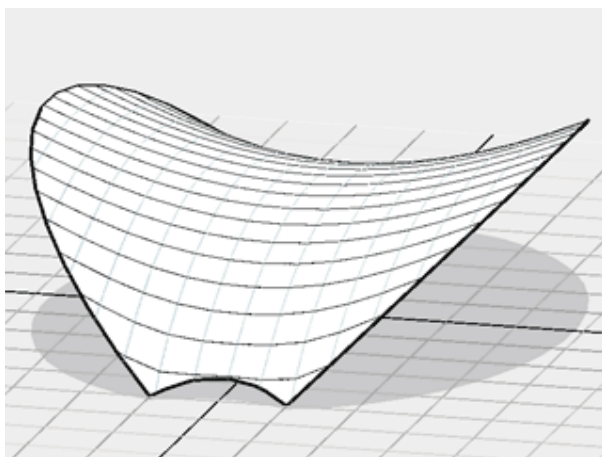


Imagen 6.1.13. Estructura mixta en paraboloides hiperbólicos con arcos inclinados.



Imágenes 7.14. Apeadero de la Cartuja.

SAGA HEADQUARTERS AMENITY BUILDING

MICHAEL HOPKINS & PARTNERS

Arquitecto: Michael Hopkins & Partners

Ubicación: Sandgate, Kent (Reino Unido)

Año Const: 1999

Superficie: 2.000 m² aprox. (57 X 56 m).

Tejido: Fibra de vidrio/PTFE

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Edificio de oficinas.

Tipo: Borde mixto

Descripción

La estructura del Saga Headquarters Amenity Building, está constituida por una serie de arcos con distinta inclinación respecto a la vertical. Estos arcos son de acero y cuentan con una sección cilíndrica y constituyen los bordes rígidos del elemento, situados en la dirección transversal del mismo. Además cabe señalar, que se han colocado una serie de vientos en los arcos, para proporcionar estabilidad al conjunto.

Al ser una estructura mixta, cuenta con bordes libres, situados en este caso en la dirección longitudinal del elemento, y sobresaliendo del mismo. La membrana en estos casos va a parar directamente al mástil, que se encuentra inclinado con respecto al eje vertical. Además, el mástil surge a partir de los módulos rectangulares que conforman las zonas laterales del edificio.

El textil usado en este caso está hecho de fibra de vidrio recubierta de PTFE. En cuanto al patroneado, no presenta mayor dificultad que los casos anteriores, uniéndose entre sí las piezas mediante soldadura. La unión de la lona con el borde rígido se realiza mediante unos elementos auxiliares.



GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

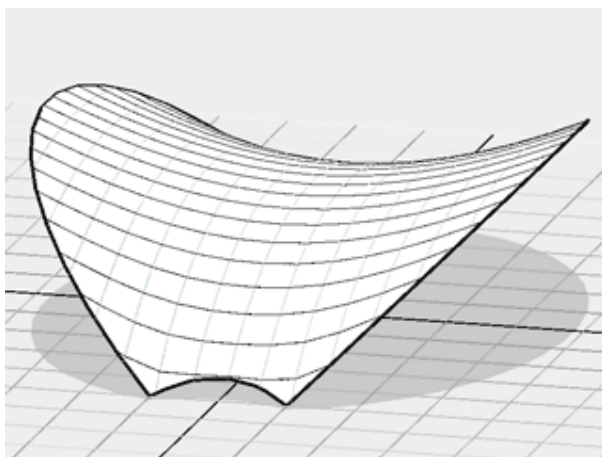
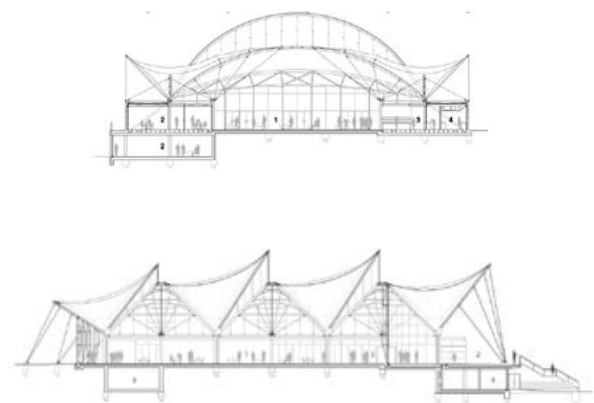


Imagen 6.1.13. Estructura mixta en paraboloide hiperbólico con arcos inclinados.



Imágenes 7.15. Saga Headquattes Amenity Buiding

ESPACIO DE CELEBRACIONES ANTIGUA GUATEMALA

CUBRE

Ingenieros: Cubre

Ubicación: Antigua Guatemala (Guatemala)

Año Const: 2013

Superficie: 300 m².

Tejido: Ferrari Precontraint 502

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Espacio de celebraciones.

Tipo: Borde mixto

Descripción

El espacio de celebraciones situado en Antigua Guatemala, en una zona con especial presencia de vegetación.

La geometría se basa en la presencia de bordes intermedios de sección circular, que nacen a un lado a partir de unos mástiles embebidos en un muro, y del otro lado van a acometer directamente al terreno. Los bordes libres, resueltos mediante cables embebidos en el dobléz de la membrana, van a parar directamente al apoyo de los arcos.

El patronaje de la lona se hace a partir de tiras en el sentido longitudinal de la estructura, adaptando la superficie de la misma. La unión se hace mediante soldadura.

Lo interesante de este proyecto con respecto a los estudiados anteriormente, es por una parte que se comprueba la posibilidad de apertura de huecos en la lona como se muestra en la última imagen. En este caso se ha previsto la existencia del árbol central, y se ha realizado el hueco en el patroneado. El otro aspecto a destacar es que se han usado dos tipos de revestimiento sobre el tejido de poliéster, que son el PVC y el PVDF.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

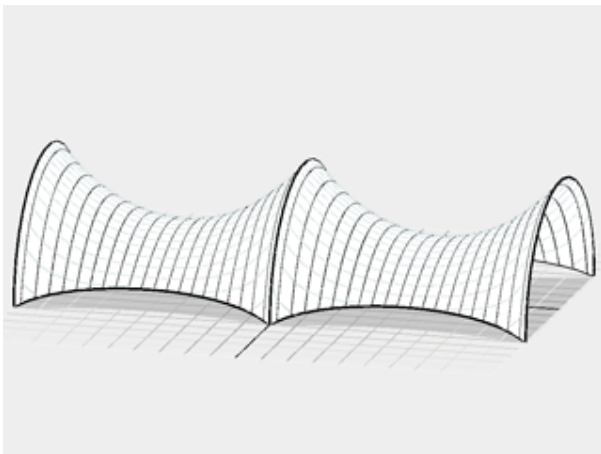


Imagen 6.1.17. Repetición modular de estructura mixta.



Imágenes 7.16. Espacio de celebraciones Antigua Guatemala.

AULA AL AIRE LIBRE

CENO MEMBRANE TECHNOLOGY GMBH

Contratista: Ceno Membrane Technology GmbH

Ubicación: Lössnitz (Alemania)

Año Const: 1999

Superficie: 340 m²

Tejido: Poliéster con PVC

Material Estructural: Acero

Tipo de uso: Educativo

Tipo: Borde mixto

Descripción

La estructura está pensada para cubrir un "aula" al aire libre, que se levanta sobre un anfiteatro, que mediante el escalonamiento resuelve el aula.

La geometría con la que se resuelve la cubierta es la conoide, cuya corona se resuelve con un elemento tejido, que finalmente se acaba con una punta de pirámide metálica. Los bordes inferiores son libres. Se usan mástiles para elevar el punto de arriostramiento de los cables de las eslingas. Como se observa en la imagen, uno de los vértices se vale de un elemento tubular horizontal a cota elevada, que lo une al punto de apoyo.

En este caso, a fin de dejar libre la zona central del anfiteatro, aparecen tres mástiles, que tienden a unirse conforme aumenta la cota, pasando a convertirse en un único elemento en la zona más alta de la estructura.

El textil usado es de poliéster recubierto con PVC, el cual se patronea en forma de elementos lineales en el sentido de la máxima pendiente, y se unen mediante soldadura.

GEOMETRÍA DE LA QUE PARTE

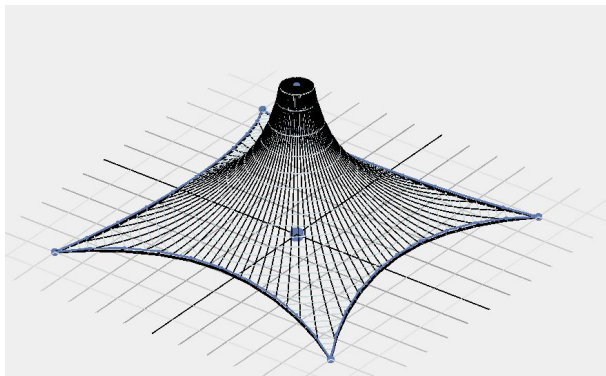


Imagen 6.1.17. Repetición modular de estructura mixta.



Imágenes 7.17. Planos Dynamic Earth Centre.

8. Propuestas geométricas para el patio de la ETSA

Una vez pasado por el estudio de todos los puntos anteriores, es momento de estudiar las distintas cubiertas de cubrición para el patio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla..

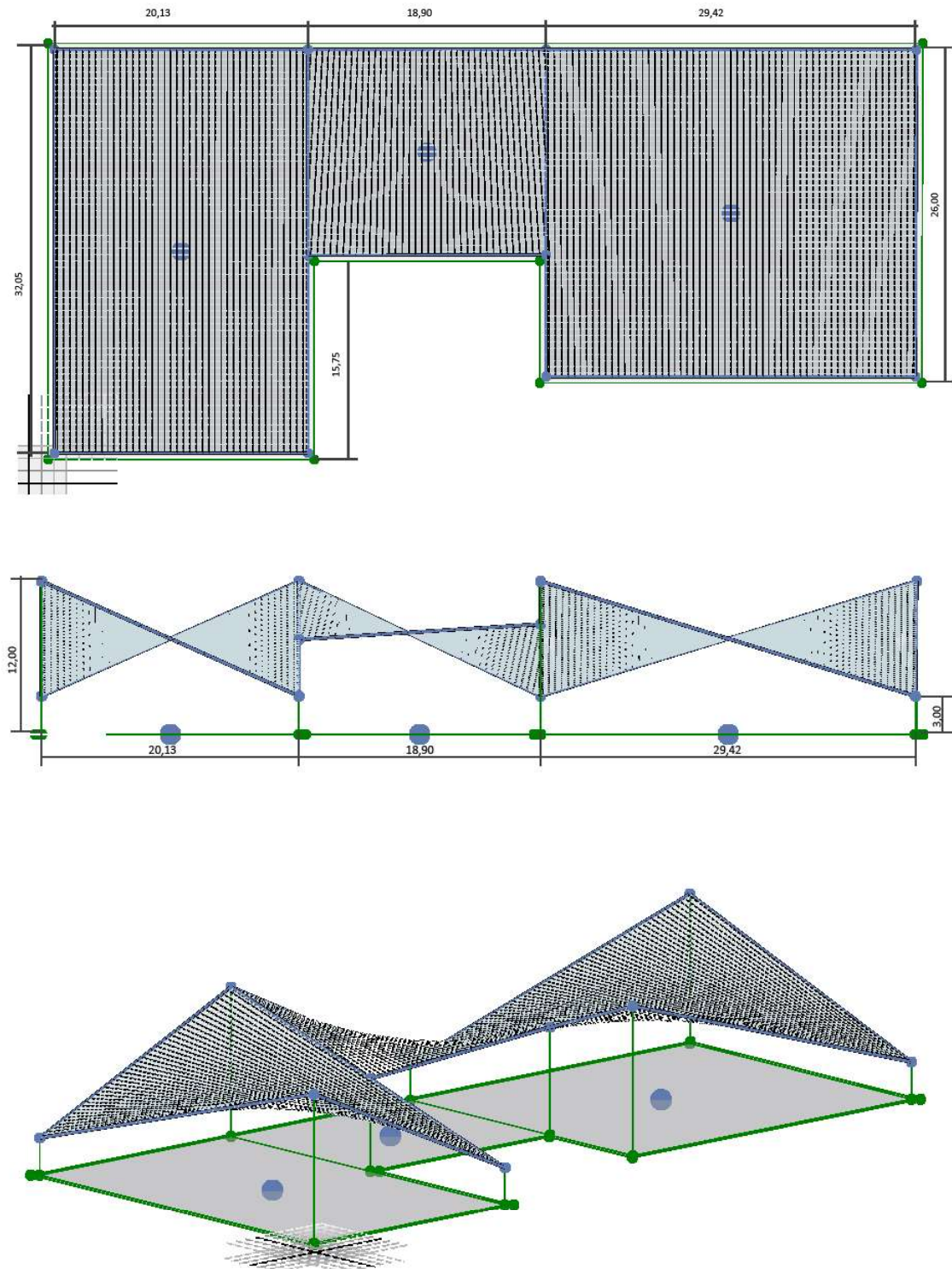
En este punto, habiendo consultados numerosas fuentes y habiendo realizado la síntesis de los elementos que he considerado más importantes, he comprobado que las formas a las que más se recurre a la hora de resolver estas estructuras son el paraboloide hiperbólico y el conoide. Por este motivo, he decidido realizar varias propuestas geométricas basadas en estas superficies, pero variando sus dimensiones en planta así como su cota en altura.

Mi propuesta de implantación consiste diseñar distintas geometrías para cubrir el patio de la escuela ETSA. Para la definición de la geometría usaré el programa FORMFINDER, a partir del que extraeré las dimensiones necesarias para el cálculo, y a partir de este punto realizaré las comprobaciones señaladas en el apartado “5.6. NOCIONES PARA LA COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA”.



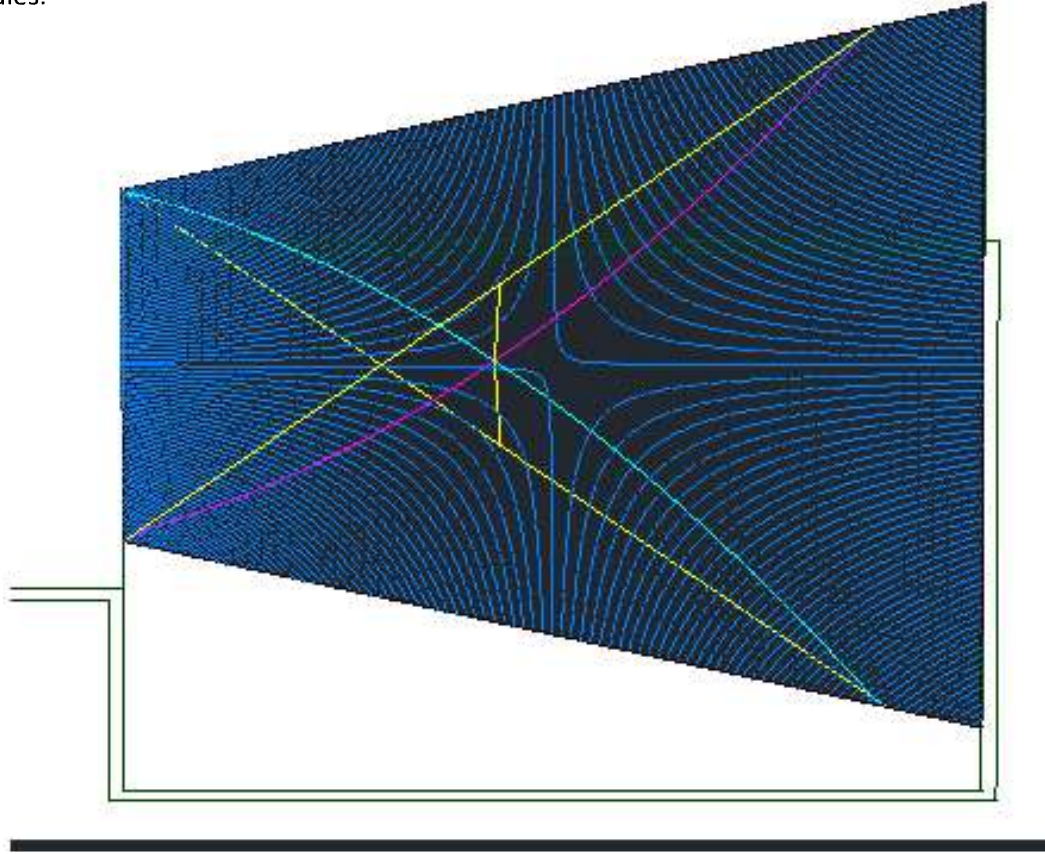
8.1. Caso 1. Paraboloide hiperbólico A

En este caso, las dimensiones con las que he introducido la geometría en Formfinder son las que se muestran en las siguientes imágenes:



Una vez introducida la geometría en el programa, voy a comprobar la geometría del paraboloide de mayor dimensión, para poder compararlo posteriormente con los demás casos.

Como ya comenté en el punto que explicaba las comprobaciones geométricas, voy a tomar el mismo valor de presión y succión que tomamos de ejemplo en la asignatura de Estructuras Especiales.



DATOS:

- Familia 1: $L_1 = 34,65 \text{ m}$; $F_1 = 3,96 \text{ m} \rightarrow F_1/L_1 = 0,114$
- Familia 2: $L_2 = 36,09 \text{ m}$; $F_2 = 3,84 \text{ m} \rightarrow F_2/L_2 = 0,106$
- q_p : 1 kN
- q_s : 0,75 kN

- **COMBINACIÓN 1: Pretensado**

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$q_1 = 1 - q_2 \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot l_2^4 \cdot f_1^2}{f_2^2 \cdot l_1^4} = \frac{q_2 \cdot 36,09^4 \cdot 3,96^2}{3,84^2 \cdot 34,65^4} = 1,25 \cdot q_2$$

$$1,25 \cdot q_2 = 1 - q_2 \rightarrow q_2 = 0,44 \rightarrow q_1 = 0,56$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} = \frac{0,56 \cdot 34,65^2}{8 \cdot 3,96^2} = 125,45 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2} = \frac{0,44 \cdot 36,09^2}{8 \cdot 3,84^2} = 117,96 \text{ kN}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 = 1,3 \cdot 125,45 \text{ kN} = \mathbf{163,09 \text{ kN}}$$

$$T_2 = 1,3 \cdot H_2 = 1,3 \cdot 117,96 \text{ kN} = \mathbf{153,35 \text{ kN}}$$

- **COMBINACIÓN 2: Presión**

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} = \frac{1 \cdot 34,65^2}{3,96 \cdot 8} = \mathbf{37,90 \text{ kN}}$$

$$H_2 = \mathbf{0}$$

- **COMBINACIÓN 3: Succión**

$$H_1 = \mathbf{0}$$

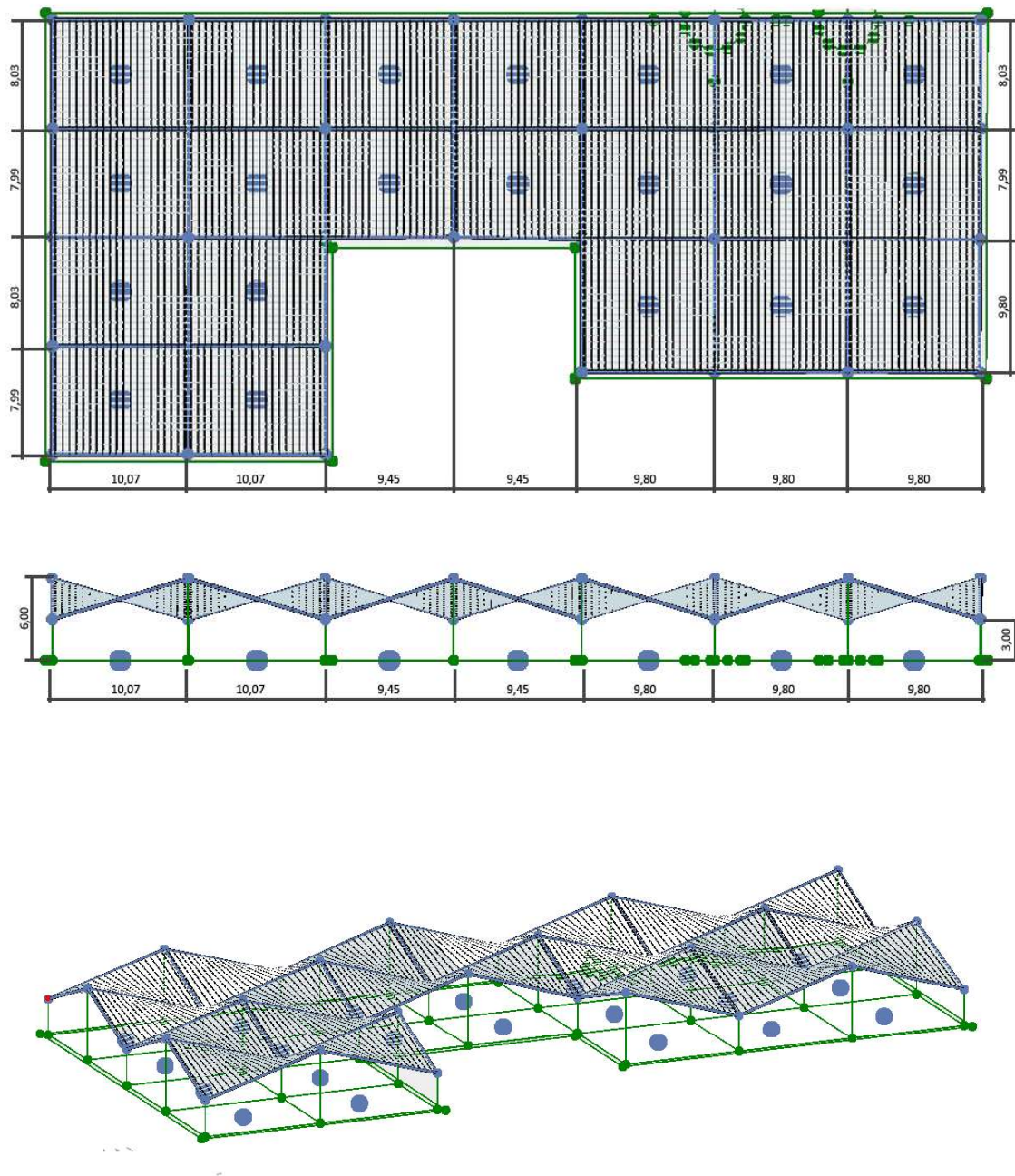
$$H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8} = \frac{0,75 \cdot 36,09^2}{3,84 \cdot 8} = \mathbf{31,80 \text{ kN}}$$

En el caso 1, los mayores esfuerzos son los debidos al pretensado. Cabe destacar que la relación entre la flecha y la luz sobrepasan el valor de 0,1 pero muy justo, lo que indica que la flecha es demasiado baja, por lo que habría que introducir una mayor diferencia de cota entre los apoyos. Sin embargo, los mástiles más altos ya tienen 12 m de altura, por lo que para el recinto en el que propongo su implantación no considero que debieran superar esta altura, por tanto y ya que la relación f/l está comprendida dentro del intervalo 0,1-0,2, continuaré con este como CASO 1.

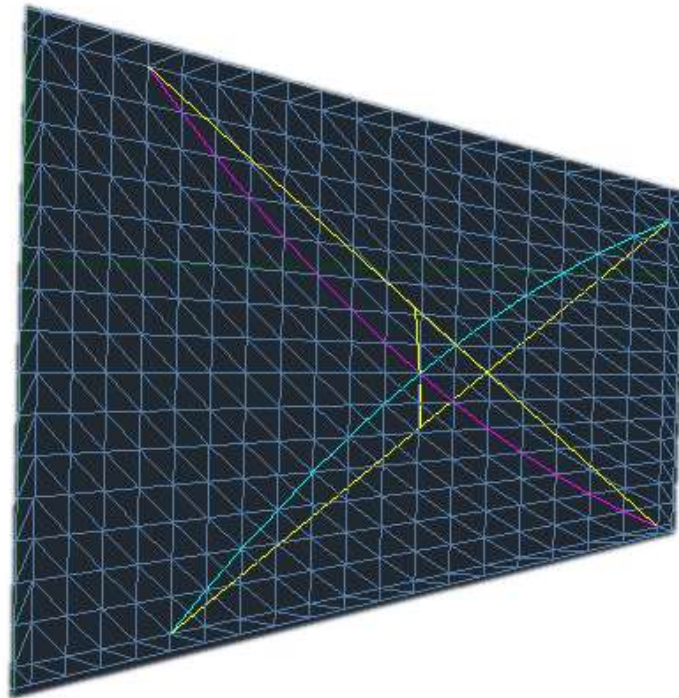
Los mayores valores, en este caso lo de la COMBINACIÓN 1 de pretensado, se tomarían finalmente a la hora de elegir un textil que aguante los esfuerzos que va a sufrir la membrana.

8.2. Caso 2. Paraboloide hiperbólico B

En este caso, sigo usando el paraboloide hiperbólico como geometría, sin embargo voy a reducir las luces entre apoyos, y de esta forma podré comparar lo que sucede según las geometrías que propongo.



Las curvas con las que se hace la comparación son las siguientes:



DATOS:

- Familia 1: $L_1 = 10,90 \text{ m}$; $F_1 = 1,18 \text{ m} \rightarrow F_1/L_1 = 0,108$
- Familia 2: $L_2 = 9,91 \text{ m}$; $F_2 = 0,97 \text{ m} \rightarrow F_2/L_2 = 0,099$
- q_p : 1 kN
- q_s : 0,75 kN

- **COMBINACIÓN 1: Pretensado**

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$q_1 = 1 - q_2 \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot l_2^4 \cdot f_1^2}{f_2^2 \cdot l_1^4} = \frac{q_2 \cdot 9,91^4 \cdot 1,18^2}{0,97^2 \cdot 10,90^4} = 1,01 \cdot q_2$$

$$1,01 \cdot q_2 = 1 - q_2 \rightarrow q_2 = 0,50 \rightarrow q_1 = 0,50$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} = \frac{0,50 \cdot 10,90^2}{8 \cdot 1,18^2} = 5,33 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2} = \frac{0,50 \cdot 9,91^2}{8 \cdot 0,97^2} = 6,52 \text{ kN}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 = 1,3 \cdot 5,33 \text{ kN} = \mathbf{6,93 \text{ kN}}$$

$$T_2 = 1,3 \cdot H_2 = 1,3 \cdot 6,52 \text{ kN} = \mathbf{8,48 \text{ kN}}$$

- **COMBINACIÓN 2: Presión**

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} = \frac{1 \cdot 10,90^2}{1,18 \cdot 8} = \mathbf{12,59 \text{ kN}}$$

$$H_2 = \mathbf{0}$$

- **COMBINACIÓN 3: Succión**

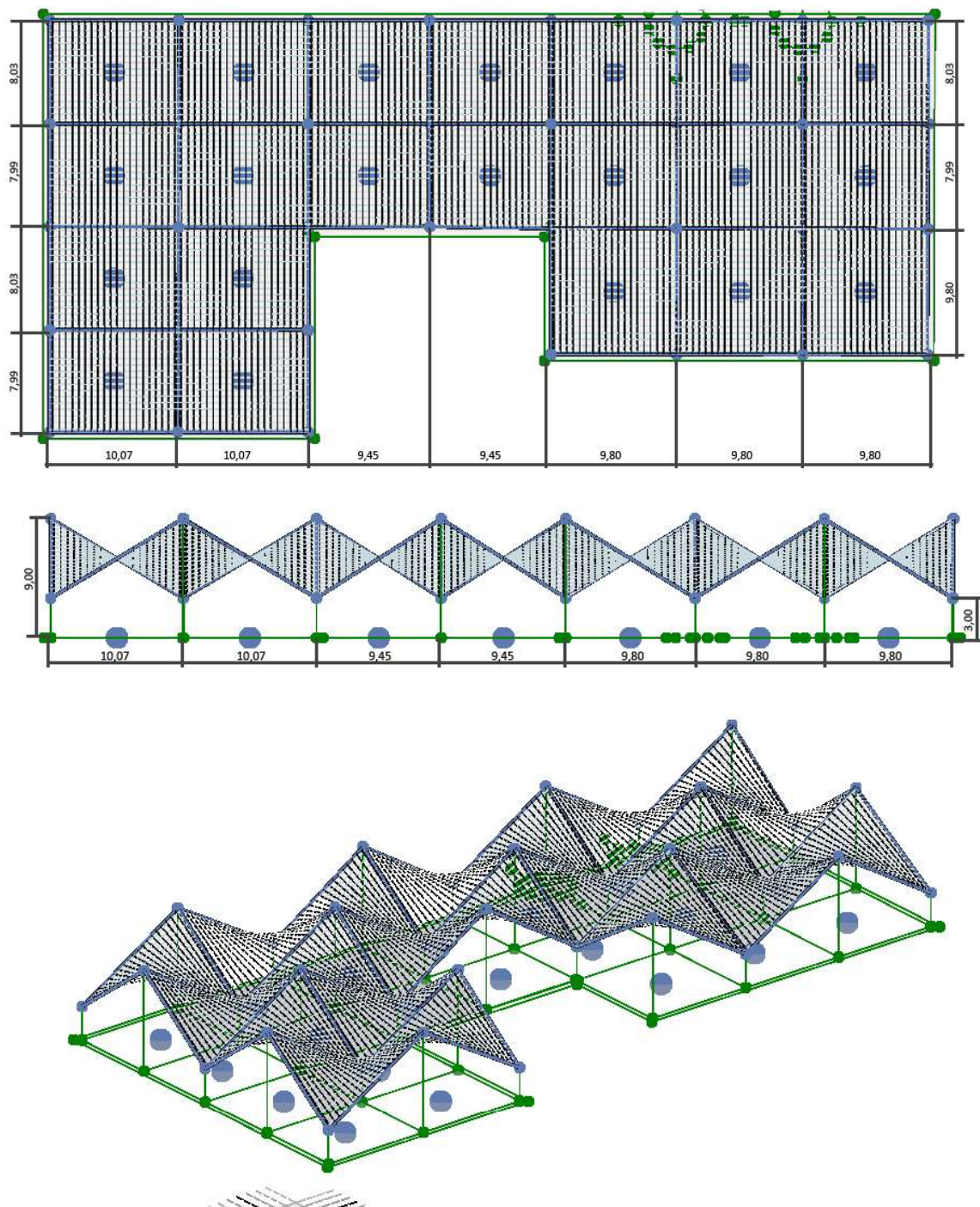
$$H_1 = \mathbf{0}$$

$$H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8} = \frac{0,75 \cdot 9,91^2}{0,97 \cdot 8} = \mathbf{9,49 \text{ kN}}$$

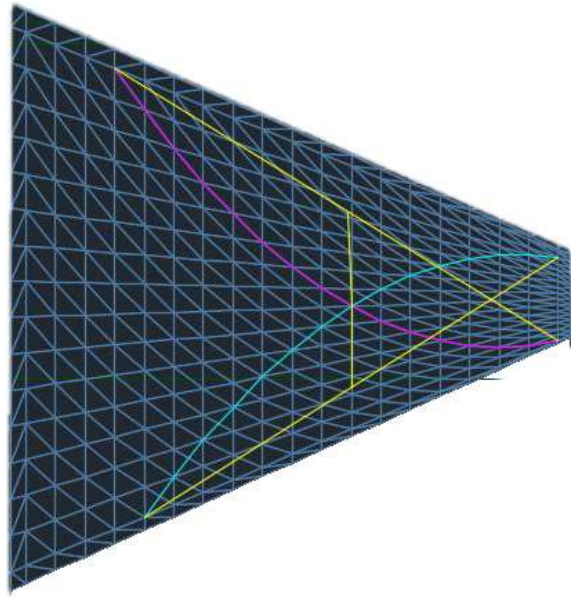
En este caso, al ser las superficies de menor tamaño, los mayores esfuerzos son los obtenidos para H1 en la COMBINACIÓN 2 y para H2 en la COMBINACIÓN 3. Para escoger el textil, por tanto, tomaría H1.

8.3. Caso 3. Paraboloide hiperbólico C

Como en el Caso 2 la relación F/L sigue siendo muy pequeña, he decidido modificar la geometría, usando como base el Caso 2, pero aumentando al doble la diferencia de cota entre los puntos más altos y los más bajos, comprobando como cambiaría la relación F/L y los esfuerzos.



Curvas tomadas para el cálculo:



DATOS:

- Familia 1: $L_1 = 10,66 \text{ m}$; $F_1 = 2,12 \text{ m} \rightarrow F_1/L_1 = 0,199$
- Familia 2: $L_2 = 9,94 \text{ m}$; $F_2 = 1,90 \text{ m} \rightarrow F_2/L_2 = 0,191$
- q_p : 1 kN
- q_s : 0,75 kN

- **COMBINACIÓN 1: Pretensado**

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$q_1 = 1 - q_2 \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot l_2^4 \cdot f_1^2}{f_2^2 \cdot l_1^4} = \frac{q_2 \cdot 9,94^4 \cdot 2,12^2}{1,90^2 \cdot 10,66^4} = 0,94 \cdot q_2$$

$$0,94 \cdot q_2 = 1 - q_2 \rightarrow q_2 = 0,52 \rightarrow q_1 = 0,48$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} = \frac{0,48 \cdot 10,66^2}{8 \cdot 2,12^2} = 1,52 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2} = \frac{0,52 \cdot 9,94^2}{8 \cdot 1,90^2} = 1,78 \text{ kN}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 = 1,3 \cdot 1,52 \text{ kN} = \mathbf{1,98 \text{ kN}}$$

$$T_2 = 1,3 \cdot H_2 = 1,3 \cdot 1,78 \text{ kN} = \mathbf{2,31 \text{ kN}}$$

- **COMBINACIÓN 2: Presión**

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} = \frac{1 \cdot 10,66^2}{2,12 \cdot 8} = \mathbf{6,70 \text{ kN}}$$

$$H_2 = \mathbf{0}$$

- **COMBINACIÓN 3: Succión**

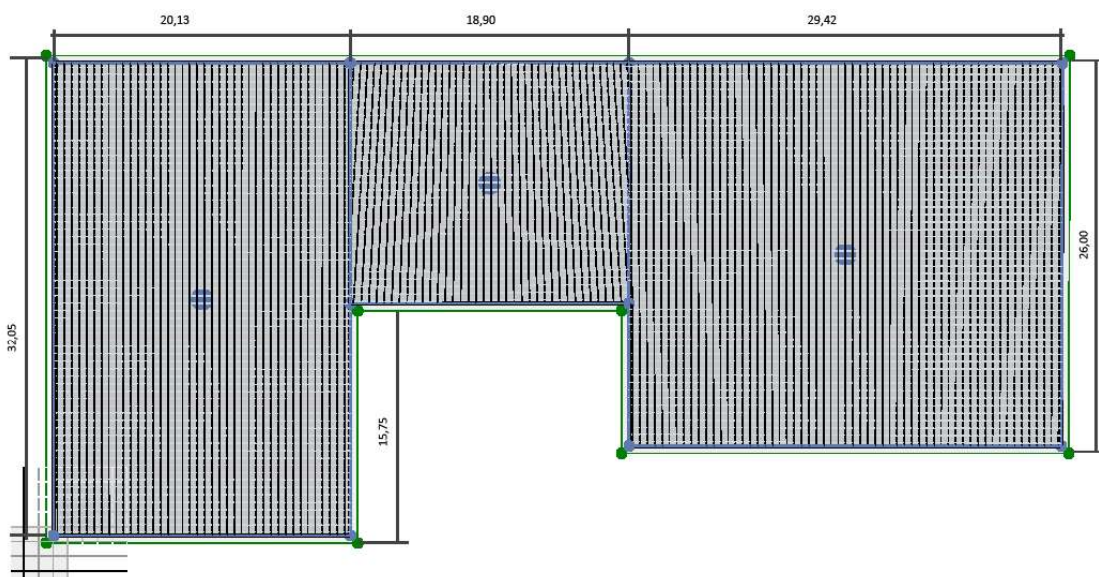
$$H_1 = \mathbf{0}$$

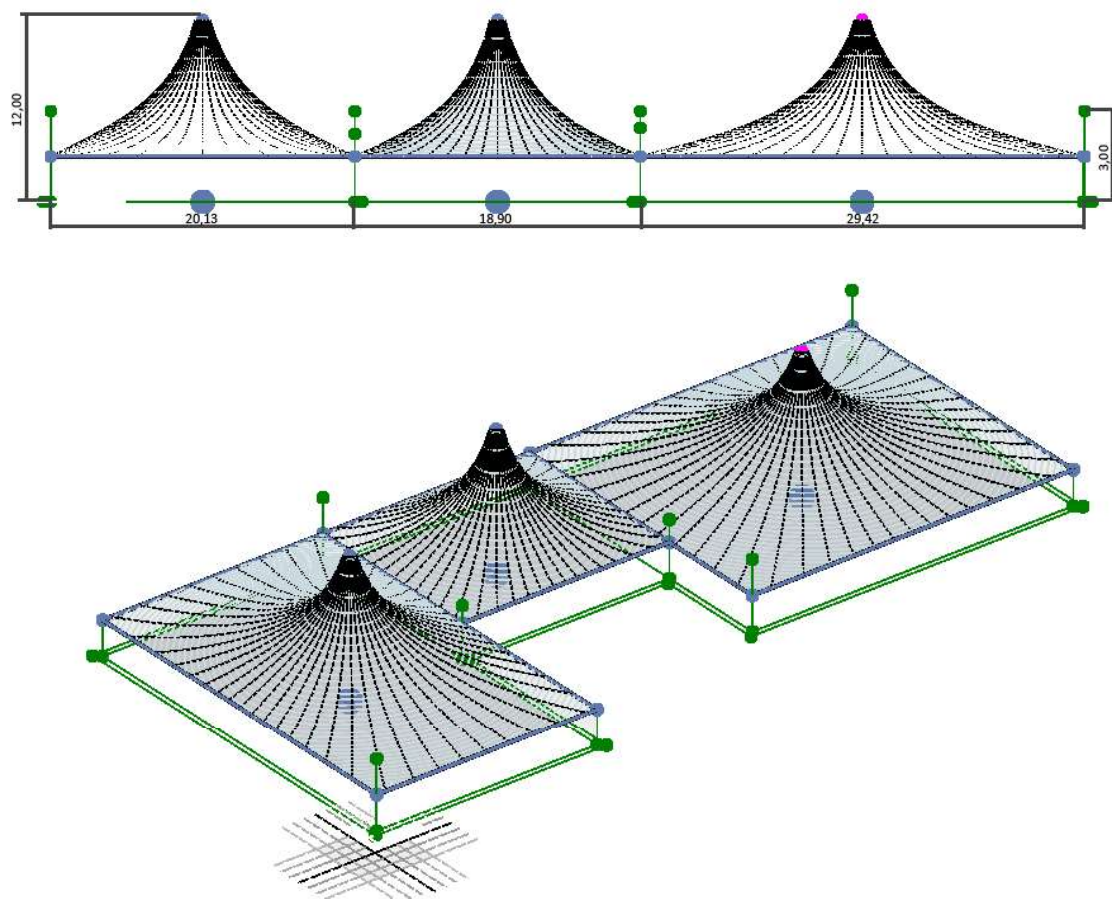
$$H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8} = \frac{0,75 \cdot 9,94^2}{1,90 \cdot 8} = \mathbf{4,88 \text{ kN}}$$

En el Caso 2 los mayores esfuerzos son los producidos a causa del viento, más concretamente por la presión del mismo. Sin embargo, cabe señalar, que al doblar la diferencia de cota del elemento, se obtienen mayores flechas para unas luces similares, con lo que se han visto significativamente reducidos los esfuerzos en las tres combinaciones. En este caso la relación entre la flecha y la luz tiene un valor bastante cercano al ideal de 0,2.

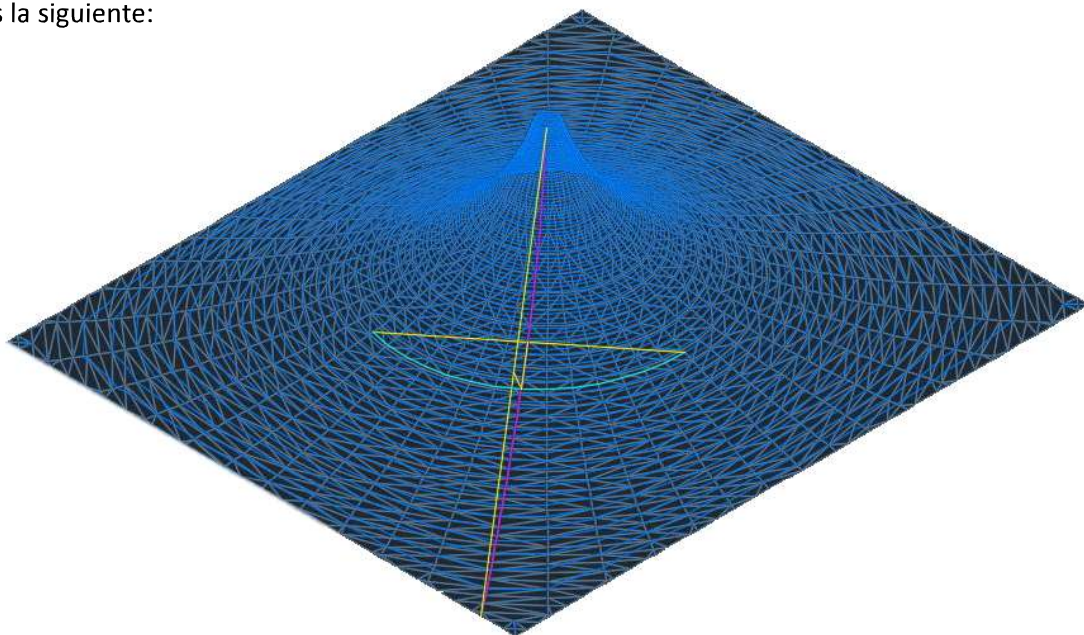
8.4. Caso 4. Conoide A

Para comparar los casos anteriores con otro tipo de geometría, voy a recurrir al conoide. En este caso los paños van a ser los mismos que he definido para el CASO 1, usando además la misma diferencia de cota para que la comparación aporte información más realista.





A la hora de realizar los cálculos de las tensiones de la circunferencia del conoide habría que recurrir a la fórmula $N = P \cdot R$, sin embargo, voy a simplificar la comprobación, haciéndola de la misma forma que para el paraboloide hiperbólico tomando, en este caso, una curva de la familia que va de la corona al borde, y en el otro sentido $\frac{1}{4}$ de la circunferencia. Al igual que en el Caso 1, voy a tomar el paño de mayor superficie, y la definición gráfica de las curvas de dicho plano es la siguiente:



DATOS:

- Familia 1: $L_1 = 20,13 \text{ m}$; $F_1 = 3,18 \text{ m} \rightarrow F_1/L_1 = 0,158$
- Familia 2: $L_2 = 10,76 \text{ m}$; $F_2 = 2,55 \text{ m} \rightarrow F_2/L_2 = 0,236$
- q_p : 1 kN
- q_s : 0,75 kN

- **COMBINACIÓN 1: Pretensado**

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$q_1 = 1 - q_2 \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot l_2^4 \cdot f_1^2}{f_2^2 \cdot l_1^4} = \frac{q_2 \cdot 10,76^4 \cdot 3,18^2}{2,55^2 \cdot 20,13^4} = 0,13 \cdot q_2$$

$$0,13 \cdot q_2 = 1 - q_2 \rightarrow q_2 = 0,88 \rightarrow q_1 = 0,12$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} = \frac{0,12 \cdot 20,13^2}{8 \cdot 3,18^2} = 0,60 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2} = \frac{0,88 \cdot 10,76^2}{8 \cdot 2,55^2} = 1,96 \text{ kN}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 = 1,3 \cdot 0,60 \text{ kN} = \mathbf{0,78 \text{ kN}}$$

$$T_2 = 1,3 \cdot H_2 = 1,3 \cdot 1,96 \text{ kN} = \mathbf{2,55 \text{ kN}}$$

- **COMBINACIÓN 2: Presión**

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} = \frac{1 \cdot 20,13^2}{3,18 \cdot 8} = \mathbf{15,93 \text{ kN}}$$

$$H_2 = \mathbf{0}$$

- **COMBINACIÓN 3: Succión**

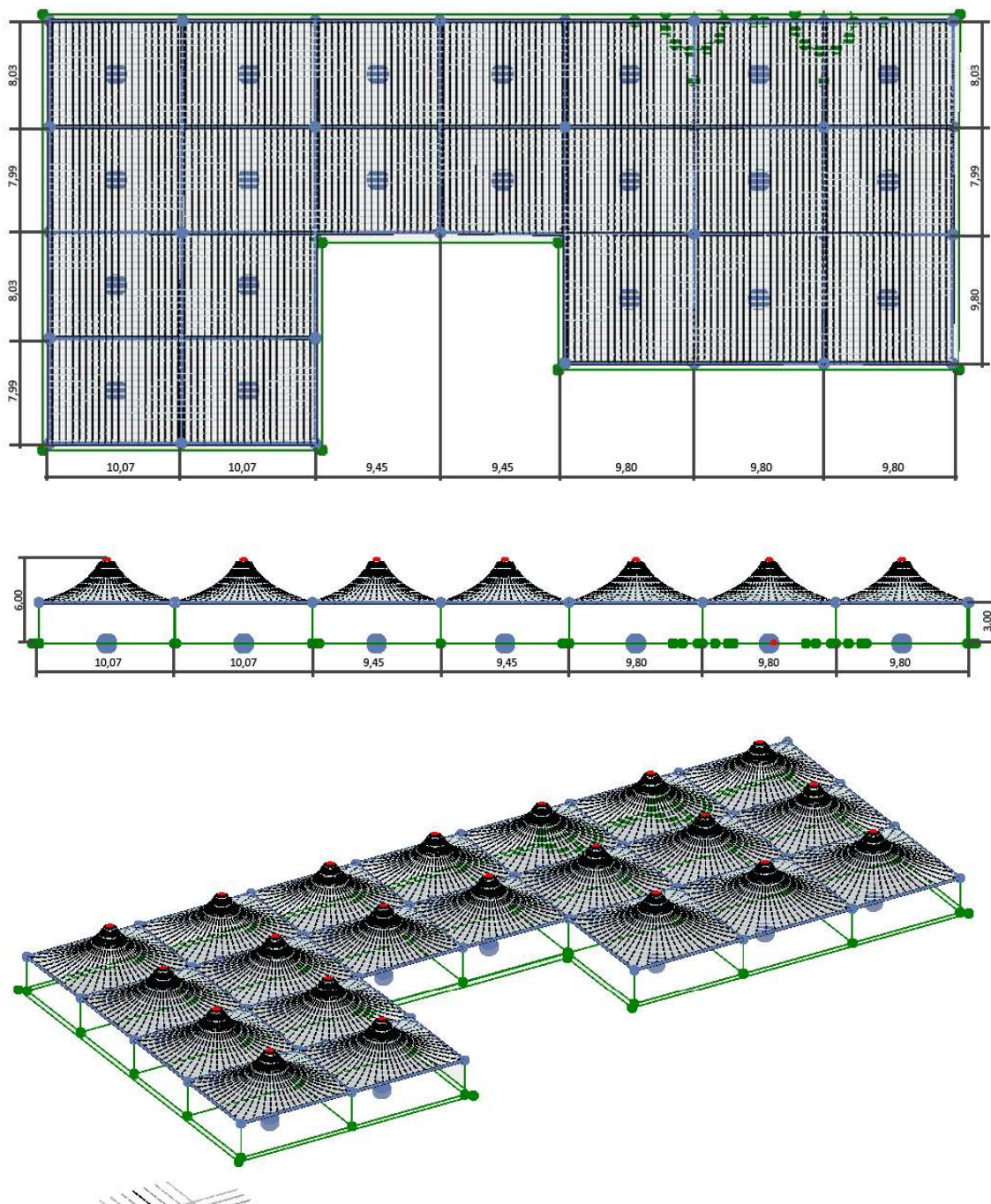
$$H_1 = \mathbf{0}$$

$$H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8} = \frac{0,75 \cdot 10,76^2}{2,55 \cdot 8} = \mathbf{4,26 \text{ kN}}$$

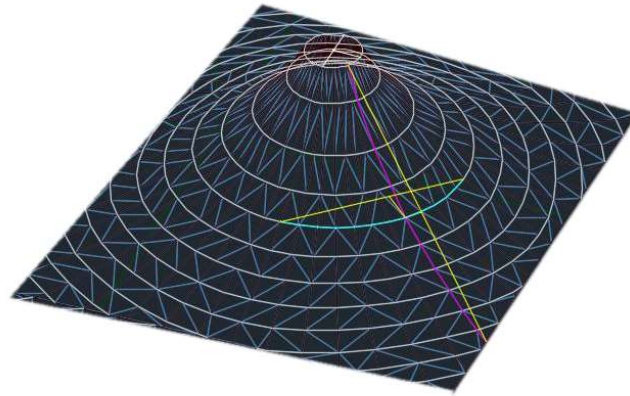
En este caso, los mayores esfuerzos son los correspondientes a H1 en la COMBINACIÓN 2, que es la debida a la presión del viento. La curvatura de la familia de curvas que se generan de gorma circular sobrepasa la felación F/L de 0,2, sin embargo es un hecho que en este caso se va a obviar porque al tratarse de un círculo, como he comentado anteriormente, el cálculo es aproximado. Además por su geometría circular, que supere ese valor no es algo anormal teniendo en cuenta las dimensiones del elemento que se está estudiando y su geometría.

8.5. Caso 5. Conoide B

Este caso supone la variante del Caso 2, introduciendo la geometría del conoide, dando el siguiente resultado:



Curvas usadas para el cálculo:



DATOS:

- Familia 1: $L_1 = 5,47 \text{ m}$; $F_1 = 0,64 \text{ m} \rightarrow F_1/L_1 = 0,117$
- Familia 2: $L_2 = 3,42 \text{ m}$; $F_2 = 0,70 \text{ m} \rightarrow F_2/L_2 = 0,204$
- q_p : 1 kN
- q_s : 0,75 kN

- **COMBINACIÓN 1: Pretensado**

$$q_p = q_1 + q_2 \quad \frac{q_1 \cdot l_1^4}{f_1^2} = \frac{q_2 \cdot l_2^4}{f_2^2}$$

$$q_1 = 1 - q_2 \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot l_2^4 \cdot f_1^2}{f_2^2 \cdot l_1^4} = \frac{q_2 \cdot 3,42^4 \cdot 0,64^2}{0,70^2 \cdot 5,47^4} = 0,13 \cdot q_2$$

$$0,13 \cdot q_2 = 1 - q_2 \rightarrow q_2 = 0,88 \rightarrow q_1 = 0,12$$

$$H_1 = \frac{q_1 \cdot l_1^2}{8 \cdot f_1^2} = \frac{0,12 \cdot 5,47^2}{8 \cdot 0,64^2} = 1,10 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{q_2 \cdot l_2^2}{8 \cdot f_2^2} = \frac{0,88 \cdot 3,42^2}{8 \cdot 0,70^2} = 2,63 \text{ kN}$$

$$T_1 = 1,3 \cdot H_1 = 1,3 \cdot 1,10 \text{ kN} = \mathbf{1,43 \text{ kN}}$$

$$T_2 = 1,3 \cdot H_2 = 1,3 \cdot 2,63 \text{ kN} = \mathbf{3,42 \text{ kN}}$$

- **COMBINACIÓN 2: Presión**

$$H_1 = \frac{q_p \cdot l_1^2}{f_1 \cdot 8} = \frac{1 \cdot 5,47^2}{0,64 \cdot 8} = 5,84 \text{ kN}$$

$$H_2 = 0$$

- **COMBINACIÓN 3: Succión**

$$H_1 = 0$$

$$H_2 = \frac{q_s \cdot l_2^2}{f_2 \cdot 8} = \frac{0,75 \cdot 3,42^2}{0,70 \cdot 8} = 1,57 \text{ kN}$$

En este caso, el mayor esfuerzo es H1 en la COMBINACIÓN 2, debida a la presión del viento. Pero el mayor valor obtenido para los esfuerzos en la otra dirección principal son los producidos por el pretensado.

9. Conclusiones

Tras haber analizado las estructuras en tracción desde sus inicios hasta la actualidad, habiendo referenciado sus elementos, estudiado casos concretos y realizado una serie de propuestas propias, las conclusiones que extraigo del estudio son las siguientes:

1. Pese a la diversidad de materiales, y soluciones de unión entre los mismos que hay en el mercado, por norma general los más usados son los que se componen de PVC y fibra de poliéster. También se recurre bastante a recubrimientos de PVDF o PTFE, salvo en casos que se quiera obtener un acabado translúcido, en este caso el más usado sería el ETFE.
2. Se suele optar por las soluciones tipo soldadura, ya que quedan ocultas y da un mejor resultado estético.
3. En general, la mayor parte de las estructuras textiles surgen a partir de una forma base de paraboloide hiperbólico o conoide, y todas a partir de superficies de doble curvatura.
4. El patroneado de las estructuras tipo hypar o conoide se suele hacer de forma similar, ya que existen suficientes referencias para ello, solo será necesario usar la triangulación en casos en que la geometría se complique mucho.

En cuanto al cálculo:

5. Las geometrías enmarcadas tipo hypar se comportan mejor con menores dimensiones.
6. Cuando la geometría del paraboloide hiperbólico es de grandes dimensiones, los mayores esfuerzos aparecen por el pretensado, al disminuir la superficie de los paños, el pretensado disminuye muy significativamente, pasando a tener mayor importancia los esfuerzos debido al viento.
7. Los esfuerzos producidos por la presión del viento, en general, son mayores que los debidos a la succión. Es decir, la COMBINACIÓN 2 suele ser la que da mayores valores, salvo en el caso en que la estructura sea de grandes dimensiones.
8. Al aumentar la diferencia de cota al doble, aumenta la flecha casi al doble también, lo que provoca que los esfuerzos de pretensado son del orden de 4 veces menores que con la mitad de altura. En el caso de las combinaciones de presión y succión, tras realizar la misma acción, son aproximadamente la mitad al doblar la flecha.
9. Comparando los casos 1 y 2 se puede observar que, al disminuir en aproximadamente $1/6$ la superficie en planta del paño y a $1/3$ la altura del mismo, se reducen muy significativamente las tensiones, sobre todo en el caso del pretensado, que disminuyen hasta ser un 4% de la tensión original. En los esfuerzos debidos al viento, el valor del caso 2 pasa a ser aproximadamente $1/3$, del valor obtenido en el caso 1.
10. Comparando los conoides con los paraboloides hiperbólicos, en estos últimos los valores de los esfuerzos son significativamente mayores que en la geometría de los conoides.
11. Por último, comparando los casos 3 y 4, se observa que el conoide de mayor superficie en planta, tiene unos valores de pretensado de aproximadamente la mitad del conoide que supone $1/6$ parte del mismo (en planta). Sin embargo, los efectos debidos al viento, son 3 veces mayores en el conoide de mayor dimensión.

10. Bibliografía

10.1. Bibliografía general

10.1.1. Libros

Faegre, Torvald. 1979. *Tents : Architecture of the Nomads*. London : J. Murray.

Koch, Klaus-Michael., Karl J. Habermann, Brian. Forster, Knut. Göppert, Thomas. Herzog, John. Pudenz, William. Taylor, and David. Wakefield. 2004. *Membrane Structures : Innovative Building with Film and Fabric*. Munich, Alemania: Prestel Publishing.

Seidel, Michael. 2009. *Tensile Surface Structures : A. Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. Berlin, Alemania: Ernst & Sohn.

Otto, Frei., Bodo. Rasch, Gerd. Pfafferoth, Adelheid. Gräfin-Schönborn, and Sabine Schanz. 1995. Frei Otto, Bodo Rasch : Finding Form. *Towards an Architecture of the Minimal*. 5th ed. Fellbach, Alemania: Axel Menges.

Drew, Philip. 2008. *New Tent Architecture*. London, Reino Unido: Thames & Hudson.

Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout.

10.1.2. Revistas

Sánchez Sánchez, José., F. Escrig, and José. Llorens. 1999. "Estructuras En Tracción." *Star: Structural Architecture*, no. 5:3–92.

Sánchez Sánchez, José., and Félix. Escrig Pallarés. 2002. "Estructuras En Tracción II." *Star: Structural Architecture*, no. 6:5–105.

10.1.3. Artículos

Cobrerros, M. A. (2013, 27 noviembre). Félix Candela y el Hypar. Recuperado 22 junio, 2018, de <http://cobrerrosvime.blogspot.com/2013/11/felix-candela-y-el-hypar.html>

10.1.4. Páginas Web

AugustaEmerita (-). *El "velum" del teatro romano*. Recuperado de: <http://colonia-augusta-emerita.blogspot.com.es/2009/07/una-imagen-vale-mas-que-mil-palabras.html>

Aware. (2018).Tensinet. Bélgica. Recuperado de: <http://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4132>

10.1.5. Páginas web de fabricantes

IASO. Recuperado de <https://www.iasoglobal.com/>

ARQUITECTURA TEXTIL. Recuperado de <https://www.arquitecturatextil.com/>

LASTRA Y ZORRILLA. <http://www.arquitextil.net/>

10.1.6. Apuntes

Apuntes tomados en clase de la asignatura de “Estructuras Especiales”. Curso 2017/2018.

10.2. Imágenes

Imagen 4.1.1. “Bodegas Bell Lloc. RCR.”

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/624166/bodegas-bell-lloc-rcr-arquitectes/53c9dc5dc07a805e080002a1-bell-lloc-winery-rcr-arquitectes-photo>

Imagen 4.1.2. “Cúpula del Reichstag. Norman Foster”

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-133112/plataforma-en-viaje-cupula-del-reichstag-norman-foster>

Imagen 5.1.3. Expansión beduina.

Fuente: Faegre, Torvald. 1979. *Tents : Architecture of the Nomads*. London : J. Murray.

Imagen 5.1.2. Esquema tienda Beduina.

Fuente: Faegre, Torvald. 1979. *Tents : Architecture of the Nomads*. London : J. Murray.

Imagen 5.1.3. Ejemplo de cubrición de un teatro romano.

Fuente: <http://colonia-augusta-emerita.blogspot.com.es/2009/07/una-imagen-vale-mas-que-mil-palabras.html>

Imagen 5.1.4. Recreación del Coliseo de Roma.

Fuente: <http://www.estortoldos.es/blog/222-historia-toldo.html>

Imagen 5.2.1. Paraboloide hiperbólico.

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 5.2.2. Conoide.

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 5.3.1. Dance Pavilion. Frei Otto.

Fuente: <https://i.pinimg.com/736x/3f/93/39/3f9339dd4a2c1f176426acb3d57b99d7.jpg>

Imagen 5.3.2. Borde rígido con elementos en celosía.

Fuente: <https://www.reeditor.com/columna/2512/2/arquitectura/arquitectura/textil/>

Imagen 5.3.3. Borde rígido con elementos lineales.

Fuente: <https://www.arquitecturatextil.com/project/particular-2/>

Imagen 5.4.2.1. Partes del cable.

Fuente: <https://ibericadelcableelevacion.com/eslingas-de-cable-de-acero/>

Imagen 5.4.3.1. Tipos de terminales de cable.

Fuente: <https://ibericadelcableelevacion.com/eslingas-de-cable-de-acero/>

Imagen 5.4.3.2. Otros elementos terminales.

Fuente: <http://cmdeuruguay.com/soquetes.html>

Imagen 5.4.3.3. Accesorios de unión.

Fuente: <http://www.sercables.com/accesorio-cable-acero.html>

Imagen 5.4.3.4. Unión textil-borde rígido.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 158

Imagen 5.4.3.5. Tipos de eslinga.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 156

Imagen 5.4.3.6. Unión entre textiles mediante cordón.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 154

Imagen 5.4.3.7. Unión entre textiles mediante pletinas.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 155

Imagen 5.4.3.8. Soportes para mástil.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 166

Imagen 5.4.3.9. Soportes de cable.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 166

Imagen 5.4.3.10. Elemento de coronación del conoide.

Fuente: Forster, Brian., and Marijke. Mollaert. 2004. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Leonberg, Alemania: Cover & Layout. Pp. 160

Imagen 5.4.4.1. Capas del textil.

Fuente: <http://www.tecnolonas.com.mx/pages.php?id=12>

Imagen 5.5.1. Unión mediante bisagras y elementos en horquilla.

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/345369865169976765/>

Imagen 5.5.2. Encuentro de dos eslingas

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/345369865169976776/>

Imagen 5.5.3. Encuentro de dos eslingas

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/177821885259573813/>

Imagen 5.5.3. Solución mixta

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/334603447300610125/>

Imagen 6.1.1. Paraboloide hiperbólico equilátero

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 6.1.2. Paraboloide hiperbólico con bordes ondulados

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.3. Paraboloide hiperbólico con bordes ondulados truncado

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.4. Paraboloide hiperbólico truncado por tres arcos

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.5. Paraboloide hiperbólico truncado por arco vertical y bordes inferiores rectos

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.6. Superficie enmarcada por aristas rectas y arco central.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.7. Superficie enmarcada por perímetro circular y arco central.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.8. Conoide con perímetro recto

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 6.1.9. Conoide invertido con perímetro recto

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.10. Conoide con arco en la zona de coronación.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.11. Conoide con borde curvo.

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 6.1.12. Conoide invertido con borde curvo.

Fuente: Propia. Herramienta Formfinder.

Imagen 6.1.13. Estructura mixta en paraboloide hiperbólico con arcos inclinados.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.14. Estructura mixta en paraboloide hiperbólico con arcos rectos.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.15. Estructura mixta con bordes curvos y arco intermedio.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.16. Estructura mixta con bordes en eslinga y arco intermedio.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.17. Conoide

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.17. Conoide invertido

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imagen 6.1.19. Repetición modular de estructura mixta.

Fuente: <https://www.formfinder.at/glossary-tag/typology/>

Imágenes 7.1. Parque Igerain Gain.

Fuente: <https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/parque-igerain-gain>

Imágenes 7.2. Village des Marques de Miramas.

Fuente: <https://www.iasoglobal.com/es-ES/proyecto/village-des-marques-de-miramas>

Imágenes 7.3. Aparcamientos del aeropuerto de Sevilla.

Fuente: <http://www.arquitextil.net/portfolio/aparcamientos-aeropuerto-sevilla/>

Imágenes 7.4. Parques Carplus.

Fuente: <http://www.arquitextil.net/portfolio/cubricion-de-parques-carplus/>

Imágenes 7.5. Club olímpico de golf.

Fuente: <https://www.archdaily.mx/mx/790664/olympic-golf-clubhouse-rua-arquitetos>

Imágenes 7.6. Centro de arte de Taiwán.

Fuente: <https://www.archdaily.com/286718/dadong-art-center-cie-mayu-architects/>

Imágenes 7.7. Centro comercial Downtown.

Fuente: <https://fabritecstructures.com/portfolio/the-shops-at-summerlin-center/>

Imágenes 7.8. Western Digital Campus.

Fuente: <https://fabritecstructures.com/portfolio/western-digital-campus-walkway-canopy/>

Imágenes 7.9. Business Conference Centre.

Fuente: <https://fabritecstructures.com/portfolio/dallas-executive-airport/>

Imágenes 7.10. Pabellón de Volkswagen.

Fuente: http://graftlab.com/portfolio_page/autostadt-roof-and-service-pavilion/

Imágenes 7.11. Arena Schierke.

Fuente: http://graftlab.com/portfolio_page/ice-stadium-schierke/

Imágenes 7.12. Dynamic Earth Centre.

Fuente: <https://www.hopkins.co.uk/projects/1/75/>

Imágenes 7.13. Planos Dynamic Earth Centre.

Fuente: Drew, Philip. 2008. *New Tent Architecture*. London, Reino Unido: Thames & Hudson. PP. 118-120.

Imágenes 7.14. Apeadero de la Cartuja.

Fuente: <http://www.arquitectil.net/portfolio/cubierta-estacion-la-cartuja/>

Imágenes 7.15. Apeadero de la Cartuja.

Fuente: <http://sevilla.abc.es/20110919/sevilla/sevi-tras-anos-espera-cercanias-201109182025.html>

Imágenes 7.15. Saga Headquattes Amenity Buiding

Fuente: <http://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4138>

Imágenes 7.16. Espacio de celebraciones Antigua Guatemala.

Fuente: <http://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4501>